

Treball de Fi de Grau

**GRAU EN ENGINYERIA EN TECNOLOGIES
INDUSTRIALS**

MEMÒRIA

Anàlisi dels esforços presents en un Patí de Vela

Autor: Marc Gol Mestre

Director: Francesc Roure Fernández

Convocatòria: Quadrimestres de tardor 2019



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH**

**Escola Tècnica Superior d'Enginyeria
Industrial de Barcelona**



1 Resum

El present treball va néixer amb l'objectiu de donar forma a la idea de millorar estructuralment una embarcació tan emblemàtica i clàssica com és el Patí de Vela o Patí Català. Basant-se sempre amb aquest objectiu inicial, el projecte ha anat adoptant diferents fases. A continuació, s'exposaran breument cadascuna d'aquestes fases les quals conjuntament constituïran la totalitat del treball.

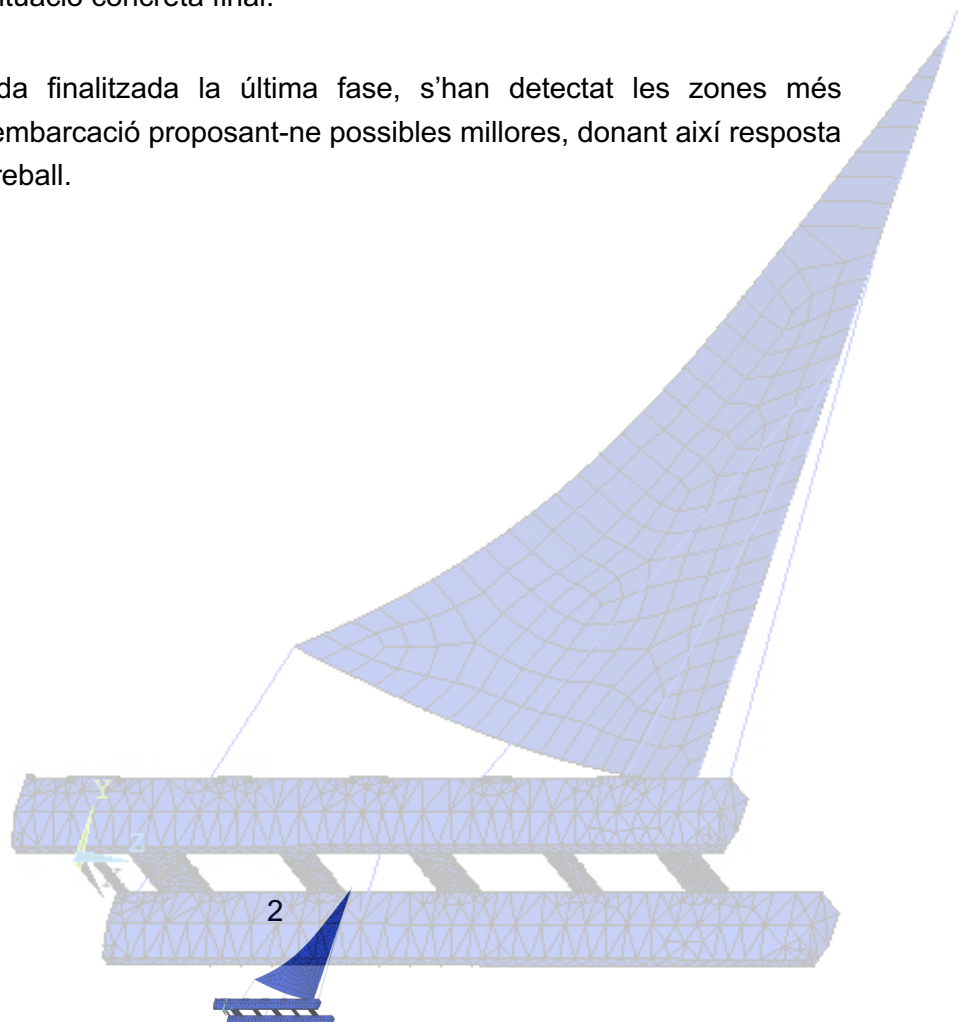
En primer lloc, s'ha realitzat una gran feina de recerca sobre l'embarcació per arribar a parametritzar una situació idònia per a l'estudi. Això ha significat un gran volum de temps dedicat a formar les bases necessàries per a construir les següents fases del projecte.

En segon lloc, s'ha dedicat gran part del treball a la feina de modelització (amb softwares de disseny i simulació) de la embarcació; entenent com a tal, tot aquell procés que ha fet possible la realització d'un model fictici de Patí de Vela el màxim semblant al prototip real.

En darrer lloc, ha estat necessària una gran feina de simulació. Aquesta, s'ha desenvolupat essencialment en dues tasques:

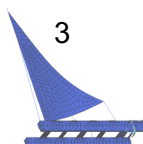
- Ajudar en la fase de modelització: principalment en la determinació dels paràmetres referents a la pressió del vent i la inclinació del Patí.
- Analitzar una situació concreta final.

Finalment, una vegada finalitzada la última fase, s'han detectat les zones més problemàtiques de la embarcació proposant-ne possibles millores, donant així resposta a l'objectiu inicial del treball.



Sumari

1	Resum	2
2	Figures i Taules	5
2.1.1	Figures	5
2.1.2	Taules	7
2.1.3	Gràfics	8
3	Prefaci	9
3.1	Breu introducció sobre el Patí de Vela	9
3.1.1	Què és un Patí de Vela?	9
3.1.2	Història del Patí de Vela	9
3.2	Origen del projecte	11
4	Introducció	12
4.1	Objectius del projecte	12
4.2	Abast del projecte	13
5	Característiques i funcionament d'un Patí de Vela	14
5.1	Característiques	14
5.1.1	Elements presents en un Patí	14
5.1.2	Materials emprats	15
5.1.3	Dimensionat	19
5.2	Funcionament	20
5.2.1	Maniobres de gir i canvi de direcció	20
5.2.2	Sortida i arribada	21
5.2.3	Altres	21
6	Situació d'estudi	22
6.1	Situació de navegació	23
6.1.1	Rumb de navegació	23
6.1.2	Inclinació	24
6.2	Forces involucrades	27
6.2.1	Força de compensació del tripulant	27
6.2.2	Pressió del vent	29
7	CAS BASE: Modelització i Simulació del patí de vela	31
7.1	Introducció al món de la Simulació: MEF	32
7.2	Disseny amb SolidWorks	33
7.2.1	Model Final 3D	33
7.2.2	Model Simplificat	36
7.3	Treball amb ANSYS Workbench	37
7.3.1	Mallat general	37
7.4	Transició al Software ANSYS APDL	39
7.5	Treball amb ANSYS APDL: Introducció	40
7.5.1	Funcionament	40
7.5.2	Exemples	46
7.6	Treball amb ANSYS APDL: Propietats dels materials	55



7.7	Treball amb ANSYS APDL: Modelització	58
7.7.1	Modelització: Màstil i Eixàrcia.....	58
7.7.2	Modelització: Vela i elements d'unió.....	61
7.7.3	Modelització: Situació de navegació.....	64
7.8	Simulacions prèvies.....	69
7.8.1	Simulació del Pes Propi.....	70
7.8.2	Simulacions variant la inclinació del Patí.....	71
7.9	Simulació final i resultats	80
7.9.1	Anàlisi global.....	81
7.9.2	Anàlisi Parcial	85
7.10	Interpretació dels resultats.....	93
8	Impacte ambiental i econòmic	94
8.1	Impacte ambiental	94
8.2	Estudi econòmic.....	95
9	Programació	97
10	Conclusions i línies futures.....	99
11	Agraïments.....	100
12	Bibliografia.....	101

2 Figures i Taules

2.1.1 Figures

Figura 1: Patins originals a rem	9
Figura 2: Incorporació d'un màstil i una vela als patins originals.....	10
Figura 3: Patí quasi complet amb vela bermudiana [3]	10
Figura 4: Patí de fibra amb recobriment de fusta a les bancades	15
Figura 5: Patí completament de fusta.....	16
Figura 6: Matriu d'elasticitat d'un material ortotròpic	17
Figura 7: Croquis del dimensionat d'un Patí de Vela.....	19
Figura 8: Patí de vela orsant.....	21
Figura 9: Diferents rumbos de navegació en funció del vent.....	23
Figura 10: PV amb una inclinacions de 0° i 45° aproximadament	25
Figura 11: PV amb una inclinació de 75° aproximadament.....	25
Figura 12 : Posició de contrapès del tripulant.....	27
Figura 13: Exemple de mallat 2D amb els components principals del MEF.....	32
Figura 14: Patins o flotadors simplificats amb SolidWorks	33
Figura 15: Suport i barra d'escota real	34
Figura 16: Suport i barra d'escota simplificats amb SolidWorks.....	34
Figura 17: Suport de màstil simplificat amb SolidWorks.....	35
Figura 18: Vista general de les quadernes	35
Figura 19: Vista lateral de les quadernes	35
Figura 20: Mallat automàtic amb ANSYS WORKBENCH	38
Figura 21: Patí amb un mallat de mida 0,04 m.....	38
Figura 22: Ampliació d'una bancada	38
Figura 23: Transició del model mallat al Software Mechanical APDL	39
Figura 24: Menú principal d'ANSYS APDL	40
Figura 25: Exemple d'elecció de disciplina d'estudi.....	41
Figura 26: Finestra de selecció d'element	41
Figura 27: Definició de la secció d'una biga	42
Figura 28: Definició de les propietats d'un Alumini	43
Figura 29: Exemple de restriccions i forces.....	44
Figura 30: Plot de les formes deformada i no deformada d'una biga	45
Figura 31: Esbós o croquis de l'experiència 1	46
Figura 32: Definició de la secció de biga – Gràfics de Deformació i tensions en l'eix x.....	47
Figura 33: Esbós o croquis de l'experiència 2	48

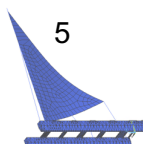


Figura 34: Model abans i després d'aplicar-hi la pressió.....	49
Figura 35: Model Patí Simplificat, fase 1	50
Figura 36: Model Patí Simplificat, fase 2: disseny de la vela.....	51
Figura 37: Model Patí Simplificat, fase 2: Mallat de la vela	51
Figura 38: Model Patí Simplificat, fase 3	52
Figura 39: Elements d'acoblament (Coupling).....	52
Figura 40: Model Patí Simplificat, fase 4	53
Figura 41: Model Patí Simplificat, fase 5	53
Figura 42: Model Patí Simplificat, fase 6	54
Figura 43: Definició propietats Fusta GL-36.....	55
Figura 44: Definició propietats Acer Inoxidable	56
Figura 45: Definició propietats Alumini	56
Figura 46: Definició propietats Polièster	57
Figura 47: Característiques de les seccions dels elements Beam i Link.....	58
Figura 48: Fases de creació del màstil	59
Figura 49: Resultat final de la creació de l'eixàrcia ferma i el màstil	60
Figura 50: Característiques de la secció de l'element Shell281	61
Figura 51: Fases de creació de la vela.....	62
Figura 52: Unions tipus Coupling entre nodes del màstil i nodes de la vela	62
Figura 53: Resultat final de la creació de la vela i dels seus elements de subjecció	63
Figura 54: Modelització de la gravetat i la partícula massica	65
Figura 55: Adició de les condicions de contorns del model.....	67
Figura 56: Resum de les masses del sistema observat per l'Output Window.....	70
Figura 57: Croquis de la situació crítica a analitzar.	80
Figura 58: Gràfic de deformacions del global del Patí.....	81
Figura 59: Mapa de desplaçaments horitzontals UX.....	82
Figura 60: Mapa de desplaçaments verticals UY	82
Figura 61: Mapa del mòdul dels vectors desplaçament (USUM)	82
Figura 62: Mapa distribució de tensions principals S1	83
Figura 63: Mapa distribució de tensions principals S3	83
Figura 64: Mapa distribució de tensions de Von-Mises SEQV	84
Figura 65: Mapa distribució de tensions de Von-Mises SEQV (sense màstil i escota)	84
Figura 66: Gràfic de deformacions del màstil	85
Figura 67: Mapa de desplaçaments horitzontals UX del màstil.....	86
Figura 68: Mapa de desplaçaments verticals UY del màstil	86
Figura 69: Mapa distribució de tensions principals S1 del màstil	87

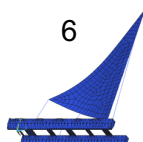
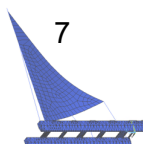


Figura 70: Mapa distribució de tensions principals S3 del màstil	87
Figura 71: Mapa distribució de tensions equivalents de Von-Mises del màstil.....	88
Figura 72: Gràfic de deformacions del conjunt bancades + flotadors	89
Figura 73: Mapa de desplaçaments horitzontals UX del conjunt bancades + flotadors	89
Figura 74: Mapa de desplaçaments verticals UY del conjunt bancades + flotadors	89
Figura 75: Mapa distribució de tensions de Von-Mises del conjunt bancades + flotadors	90
Figura 76: Mapa distribució de tensions principals S1 de la barra d'escota.....	91
Figura 77: Mapa distribució de tensions principals S3 de la barra d'escota.....	91
Figura 78 Mapa distribució de tensions equivalents de Von-Mises de la barra d'escota	92

2.1.2 Taules

Taula 1: Propietats de tres fustes utilitzades en fabricació de patins (unitats SI) [5].....	16
Taula 2: Propietats de l'Alumini 61S (unitats SI) [5]	17
Taula 3: Propietats de l'Acer Inoxidable utilitzat (unitats SI).....	17
Taula 4: Posició del tripulant en l'eix longitudinal	28
Taula 5: Posició del tripulant en l'eix transversal, en funció de l'angle.....	28
Taula 6: Pressions totals en funció del vent	30
Taula 7: Components normals de les Pressions en funció del vent i la inclinació.....	30
Tabla 8: Taula resum de les propietats de cada component del Model	68
Taula 9: Components de la gravetat en els eixos globals	71
Taula 10: Resultats de la simulació amb 10 graus d'inclinació, unitats SI	72
Taula 11: Components de la gravetat en els eixos globals	73
Taula 12: Resultats de la simulació amb 15 graus d'inclinació, unitats SI	73
Taula 13: Components de la gravetat en els eixos globals	74
Taula 14: Resultats de la simulació amb 25 graus d'inclinació, unitats SI	74
Taula 15: Components de la gravetat en els eixos globals	75
Taula 16: Resultats de la simulació amb 35 graus d'inclinació, unitats SI	75
Taula 17: Components de la gravetat en els eixos globals	76
Taula 18: Resultats de la simulació amb 40 graus d'inclinació, unitats SI	76
Taula 19: Components de la gravetat en els eixos globals	77
Taula 20: Resultats de la simulació amb 50 graus d'inclinació, unitats SI	77
Taula 21: Components de la gravetat en els eixos globals	78
Taula 22: Resultats de la simulació amb 60 graus d'inclinació, unitats SI	78
Taula 23: Components de la gravetat en els eixos globals	78
Taula 24: Resultats de la simulació amb 70 graus d'inclinació, unitats SI	78
Taula 25: Components de la gravetat en els eixos globals	79
Taula 26: Resultats de la simulació amb 65 graus d'inclinació, unitats SI	79
Taula 27: Components de la gravetat en els eixos globals	79



Taula 28: Resultats de la simulació amb 61 graus d'inclinació, unitats SI	79
Tabla 29: Taula resum de les despeses del projecte	96
Taula 30: Tasques i duracions que han constituït el projecte.....	97
Taula 31: Diagrama de Gantt del Projecte	98

2.1.3 Gràfics

Gràfic 1: Desglossament de les despeses totals.....	96
---	----

3 Prefaci

3.1 Breu introducció sobre el Patí de Vela

3.1.1 Què és un Patí de Vela?

El Patí de Vela o Patí Català, és una embarcació monotip de vela lleugera que gaudeix d'unes característiques de disseny i utilització úniques en el món.

És una embarcació de tipus catamarà, basada en dos flotadors paral·lels d'igual mida units per 5 bancades, dissenyada per a un tripulant i que per a la seva propulsió utilitza una única vela de forma aproximadament triangular.

També gaudeix de la gran singularitat de no utilitzar timó¹, orsa² ni botavara³ per al seu govern. I com a conseqüent, s'utilitza el desplaçament del pes del tripulant endavant i endarrere com a eina per a maniobrar l'embarcació.

3.1.2 Història del Patí de Vela

El Patí de Vela va néixer a les platges de Badalona entre el 1920 i 1925 arrel d'una necessitat ciutadana [1]. En aquella època era famosa la gran contaminació que regnava a la vora del mar de les platges del litoral Barceloní. Davant la impossibilitat de banyar-se en aigües tan contaminades, es va inventar un artefacte dotat de dos flotadors de fusta units per bancades que, mitjançant un rem, permetia als ciutadans allunyar-se de la costa (*Figura 1*).



Figura 1: Patins originals a rem

¹ **Timó:** Element principal de govern d'una embarcació.

² **Orsa:** Element longitudinal que va de proa a popa per la part inferior d'una embarcació i que serveix per a fer de contrapès quan una embarcació s'inclina.

³ **Botavara:** Element cilíndric utilitzat per al recolzament inferior i lliure moviment de les veles de tipus aurica o bermudiana.

Més endavant, va sorgir la idea d'incorporar-hi un mànstil i una vela per a reduir els esforços que requeria desplaçar-se mar en dins (*Figura 2 i 3*). I no va ser fins a la dècada dels 40, que es va arribar a conformar el Patí de Vela amb les mides i pes tal i com les coneixem actualment. La història diu que es va realitzar una competició a Vilanova i la Geltrú l'any 1942 on patins de totes mides competien per a decidir quin seria el disseny més ràpid i sòlid dels participants. És per això que els guanyadors, els germans Badalonins Luís i Emili Mongé, van donar lloc al primer model unificat de Patí, del qual se'n realitzaren els seus respectius plànols posteriorment.



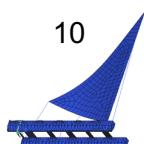
Figura 2: Incorporació d'un mànstil i una vela als patins originals



Figura 3: Patí quasi complet amb vela bermudiana [3]

Actualment, el Patí de Vela està reconegut com a embarcació en sèrie, i es posat a prova anualment en campionats estatals (*Campionat d'Espanya de Patí de Vela*) celebrats a Barcelona al *Club Natació Barcelona*.

Avui en dia existeixen flotes de patins de vela a Comunitats autònomes com: Catalunya, Andalusia, València, Illes Balears i Múrcia. També s'estan començant a estendre cap a països europeus com Bèlgica, Holanda i França, on ja es fabriquen els seus propis patins.



3.2 Origen del projecte

Pel que fa a l'origen del projecte, tot va començar a finals de l'estiu del 2017 quan la meva família va comprar un Patí de Vela a la platja de Sant Antoni de Calonge. Allà, vaig començar a endinsar-me en el curiós món del Patí de Vela. Al principi només observava als regatistes i intentava entendre el funcionament de l'embarcació. Després vaig començar a fixar-me en les seves característiques i funcionament, no entenia com unes embarcacions tan robustes i pesades podien córrer a tanta velocitat tenint en compte la simplicitat de l'embarcació.

Més endavant, em vaig fixar en la importància que tenien les condicions meteorològiques i el mar pel Patí de Vela. En moltes ocasions l'entorn pot resultar més perillós i imprevisible del que sembla, on una simple sortida a navegar podria convertir-se en un accident fatal. Per tot això, és essencial navegar amb una embarcació preparada per resistir el pitjor.

Tornant al Patí de Vela, tot i ser una embarcació que ha evolucionat molt des del primer model dels germans Mongé, sempre ha estat limitat en dimensions i pes pels estàndards de competició, buscant sempre optimitzar la velocitat. És per això que tampoc ha estat estudiat en exactitud ni optimitzat prou en termes de resistència de la estructura. Si que es pot dir que en termes de pes i velocitat ha millorat molt, però tot i així, poca gent coneix avui en dia les limitacions estructurals d'un Patí de Vela.

Així va ser com va néixer aquesta necessitat d'investigar la millora d'aquesta embarcació de forma que fos més segur fer travesses de grans longituds fent prevaldre la seguretat i la resistència en lloc de la velocitat.

4 Introducció

4.1 Objectius del projecte

S'han contemplat diferents objectius a complir per a la realització del present projecte.

En primer lloc, es buscarà entendre el funcionament estructural i la capacitat de resistència de l'embarcació a estudiar, ja que, aquesta es basa en una construcció totalment artesanal la evolució de la qual s'ha fonamentat sempre en la metodologia bàsica de prova i error. També s'haurà de realitzar un estudi previ de les condicions en les que s'estudiarà l'embarcació així com establir el marc concret amb el que es treballarà al llarg del projecte.

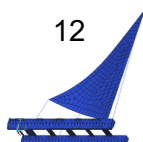
En segon lloc, es buscarà trobar les debilitats estructurals de l'embarcació realitzant un estudi dels esforços. Per això, serà necessària la immersió en el món del disseny amb *SolidWorks* i després, serà essencial la familiarització amb l'eina de simulació que s'utilitzarà en el present treball anomenada *ANSYS*.

Tenint en compte la informació anterior, caldrà una gran feina d'estudi i pràctica amb el software de simulació. Per això, el present treball també buscarà aprofundir en el modelatge de totes i cadascuna de les parts del Patí de forma que s'intenti arribar a una semblança quasi perfecte entre la situació real d'estudi real i la simulada.

Per últim, és buscarà trobar els punts dèbils, estructuralment parlant, de cadascuna de les parts principals que componen el Patí. D'aquesta manera se'n podran buscar possibles millores per a fer del Patí de Vela una embarcació més robusta.

En conclusió, els objectius principals que s'han plantejat per al projecte són:

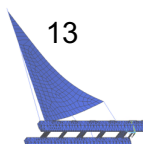
- 1) Immersió teòrica en el món del Patí de Vela per a determinar la millor situació per estudiar.
- 2) Treball de modelització per a portar al món de la simulació la situació teòrica d'estudi determinada en el punt 1).
- 3) Estudi exhaustiu dels esforços presents en el global del Patí de Vela mitjançant la simulació de la situació modelitzada en el punt 2).
- 4) Estudi de cadascuna de les parts que conformen el Patí per separat i posterior millora d'aquestes.



4.2 Abast del projecte

Pel que fa a l'abast del projecte, aquest ha estat limitat bàsicament pel període reglamentari establert per la universitat. Tanmateix, fent ús de la duració establerta, aquest projecte es basarà en realitzar un estudi teòric on no s'arribarà en cap cas a la fase de construcció i millora d'un Patí de Vela sinó que es centrarà en una simple interpretació d'un anàlisi estructural.

No obstant, aquest estudi teòric pretén abastar diferents fases d'aprenentatge i investigació. D'una banda el projecte inclourà una important feina de pràctica i familiarització amb softwares de disseny i simulació, acabant per analitzar la resistència de la embarcació. D'altra banda, el treball pretén arribar a proposar possibles millores i solucions per a les zones més afectades estructuralment un cop vist l'anàlisi.



5 Característiques i funcionament d'un Patí de Vela

5.1 Característiques

Tal i com ja s'ha comentat amb anterioritat, el Patí de Vela o Patí Català és una embarcació de tipus catamarà la qual ha aconseguit expandir-se arreu d'Europa gràcies a les seves característiques singulars.

En tot moment i a partir d'ara, quan es parli de Patí de Vela o Patí Català es farà referència al tipus *Patí Sènior de Competició* (i no d'altres com el *Júnior de Competició*) del qual en coneixem les seves especificacions tècniques, plànols i normativa gràcies al document "*Reglamento de la Disciplina Patín a Vela*" [2] del qual se'n farà referència constantment al llarg del present projecte.

Aquest document és el Reglament actualment vigent (emès el 2018) i s'ha aconseguit mitjançant l'accés al lloc web ADIPAV (*Asociación Deportiva Internacional de Propietarios de Patines a Vela*) [1] del qual també se'n farà referència més endavant.

5.1.1 Elements presents en un Patí

A continuació es presentarà un llistat del conjunt d'elements que constitueixen un Patí de Vela amb les seves respectives definicions:

- Dos **patins**: flotadors paral·lels i d'igual mida que donen flotabilitat a l'embarcació.
- Cinc **bancades**: taulons quasi rectangulars que uneixen ambdós flotadors i donen rigidesa al Patí.
- **Quadernes**: elements de separació interiors dels flotadors que donen rigidesa a aquests.
- **Màstil**: element vertical de forma cilíndrica i buit per l'interior que recolza sobre una ròtula esfèrica.
- **Eixàrcia**: conjunt de cables que aguanten el màstil.
- Una **vela** de tipus bermudiana (quasi triangular), subjectada al màstil mitjançant una guia.
- **Barra d'escota**: element de forma cilíndrica i lleugerament corbada que subjecta i facilita el canvi de costat de la vela, mitjançant l'escota com a element intermedi.
- **Escota**: cap utilitzat per a subjectar la vela per el seu extrem lliure.
- Conjunt de 3 politges, per a reduir la força necessària per aguantar la vela.
- **Drissa**: cap utilitzat per a pujar i subjectar la vela en el màstil.
- Conjunt de sis caps, per ajustar la vela i el màstil en diferents posicions de navegació.
- Xarxa de fil (opcional, per comoditat).
- Conjunt de cingles o cintes robustes per a la subjecció del tripulant.



5.1.2 Materials emprats

Per tal d'identificar els diferents materials utilitzats per a la construcció de les diferents parts del Patí de Vela, s'ha recorregut al document reglamentari anteriorment esmentat [2] el qual exposa els diferents materials permesos per a la construcció de cada element. Al llarg d'aquest apartat s'aniran exposant els diferents tipus de materials utilitzats en les diferents parts del Patí d'acord amb la normativa esmentada. Posteriorment, se'n donaran les seves característiques bàsiques, moltes de les quals seran útils per a l'estudi de simulació.

Flotadors i bancades

Pel que fa als flotadors i les bancades, la normativa especifica que només podran ésser construïts amb un o més materials dels següents: fusta, fibra de vidre, escumes plàstiques, resines plàstiques termostables, pintures, coles resistents a l'aigua i tancaments metàl·lics normals. La normativa també especifica que els elements d'unió com ferramentes i cargols només podran ser d'acer inoxidable, ferro galvanitzat, bronze naval o alumini.

Tot i així, observant amb una perspectiva més real el món actual del Patí de Vela, avui en dia la gran majoria de conjunts d'embarcacions es construeixen dels següents combinacions de materials: totalment de fibra, totalment de fusta (*Figura 5*) o construccions mixtes (*Figura 4*).



Figura 4: Patí de fibra amb recobrint de fusta a les bancades



Figura 5: Patí completament de fusta

Tot i els avantatges que ofereixen en algunes condicions les construccions de fibra, encara avui en dia exigeixen un gran esforç econòmic en comparació amb els de fusta. Així mateix, actualment segueix essent el Patí de Vela de fusta el més abundant i el més demandat.

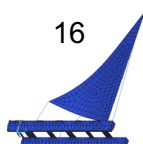
Els tipus de fusta més utilitzats tradicionalment són: *Ayous*, *Akajou* o *Samanguila* i *Okume*, tots tres d'origen Africà. Coneguts per la seva gran flexibilitat necessària per a la navegació però també per la seva rigidesa. Tot i així, actualment és molt utilitzada per a la construcció nàutica el *laminat GL-36* el qual, dins del món de les fustes laminades encolades és la més resistent. Tanmateix, encara avui en dia, depèn molt del fabricant el tipus de fusta utilitzat a cadascuna de les diferents parts que engloben el conjunt bancada i flotador. A continuació es podrà observar en la *Taula 1* les diferents propietats trobades del Laminat GL-36.

Nom	Mòdul d'elasticitat		Densitat	Coeficient de Poisson XY	Mòdul de Rigidesa XY	Límit elàstic
	E_x	E_y				
Laminat GL-36	1.47e+10	4.90e+08	450	0,43	9.10e+08	1,10e+10

Taula 1: Propietats de tres fustes utilitzades en fabricació de patins (unitats SI⁴) [5]

Com es pot observar en la *Taula 1*, les diferents propietats de la fusta s'han segmentat en els tres eixos cartesianes x, y i z, a causa de la naturalesa resistent d'aquest material. Efectivament, la fusta no es un material isotròpic, sinó que en funció de la direcció en que s'aplica una càrrega, el material respon de forma diferent. Aquest tipus de materials com la fusta s'anomenen ortotròpics. Els materials ortotròpics són de la família dels materials anisòtrops però que peculiarment incorporen 3 plans de simetria perpendiculars entre ells. Per tant, tal i com es pot observar en la matriu d'elasticitat

⁴ **SI**: [Sistema Internacional] totes les unitats d'aquest treball s'expressaran en el sistema internacional de les unitats: Metres, Kilograms, Pascals, Newtons...



següent (*Figura 6*), les propietats en les direccions 1, 2 i 3, es mantenen constants en les seves corresponents direccions.

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}$$

Figura 6: Matriu d'elasticitat d'un material ortotròpic

Màstil

En el cas del màstil, la normativa especifica que els materials permesos per a la construcció del màstil ha d'ésser o alumini o fusta. En aquest cas, tot i ser originàriament la fusta el material més utilitzat, ja avui en dia la major part dels patins disposen d'un màstil d'alumini com a conseqüència de les grans millores a nivell mecànic i de lleugeresa que aporten.

Per a la fabricació de màstils en el món de la nàutica és comú utilitzar aliatges d'alumini com l'*Alumini 61S* i l'*Alumini EN AW-5086*. Tanmateix, al llarg d'aquest treball es treballarà exclusivament amb l'*Alumini 61S*, un aliatge molt complet de Magnesi i Silici conegut per les seves bones propietats mecàniques i anticorrosives.

Cal també esmentar, que l'alumini és un material isotròpic i per tant per a definir-lo només caldrà especificar-ne la *Densitat*, el *Mòdul d'Elasticitat* (o *Young*) i el *Coefficient de Poisson* (*Taula 2*).

Nom	Mòdul d'elasticitat	Densitat	Coefficient Poisson	Límit elàstic
Alumini 61S	6.89e+10	2700	0,32 – 0,34	5,50e+07

Taula 2: Propietats de l'Alumini 61S (unitats SI) [5]

Barra d'escota

Seguint també les especificacions reglamentaries de la normativa, per a la definició del material de la *Barra d'Escota* s'utilitzarà, un tipus d'acer inoxidable amb una alta resistència a la corrosió (*Taula 3*).

Nom	Mòdul d'elasticitat	Densitat	Coefficient Poisson	Límit elàstic
Acer inoxidable	2,00e+11	7700	0,30 – 0,31	3,00e+07

Taula 3: Propietats de l'Acer Inoxidable utilitzat (unitats SI) [5]

Vela

En el cas de la vela del Patí, aquesta també pot variar de material en funció del fabricant o de la utilitat que se li en vulgui donar.

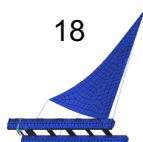
Per un costat es troben les veles de Niló (Nylon), les quals resulten molt flexibles i donen opció a doblegar-se i agafar més volum de vent. Tot i així, en el món del Patí de Vela és més usual utilitzar veles rígides i sense sabres⁵. Tanmateix, per a sintetitzar aquest segon tipus de veles s'utilitza el Polièster, que tot i donar més resistència que el Niló, però perd flexibilitat.

Per a tot això, al llarg d'aquest treball s'utilitzarà com a material predeterminat per les veles el *Dacron*, nom comercial donat als teixits de Polièster utilitzats per a sintetitzar veles. Les propietats d'aquest es poden trobar a la *Taula 4* expressades en unitats del Sistema Internacional.

Nom	Mòdul d'elasticitat	Densitat	Poisson Ratiu	Límit elàstic
Polièster (Dracon)	6.20e+11	600	0,16	3,50e+08

Taula 4: Propietats del Polièster Dracon (unitats en SI) [5]

⁵ **Sabres**: es un tipus d'accessori en forma rectangular i allargada que s'utilitza per donar rigidesa i forma a una vela.



5.1.3 Dimensionat

Pel que fa les dimensions de l'embarcació objecte d'estudi, aquestes es troben detallades als plànols originals exposats en el primer punt dels *Annexos*. Aquets plànols s'han extret del document *Reglament Sènior* [2] del lloc web de referència *Adipav* [1].

Tanmateix, a continuació es mostrà un croquis simple amb les mesures bàsiques que permeten visualitzar un Patí en l'espai (*Figura 7*).

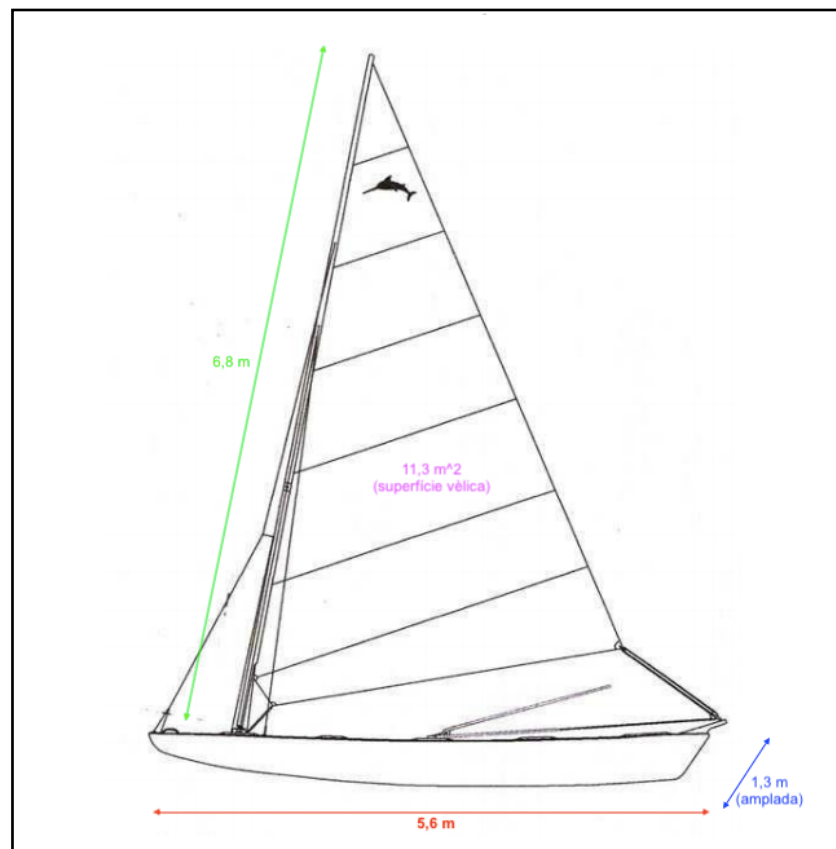


Figura 7: Croquis del dimensionat d'un Patí de Vela

5.2 Funcionament

En aquest apartat es veurà com, donat peculiar disseny del Patí de Vela, neix la manera de governar⁶ o funcionament d'aquesta embarcació.

Partint de la base que l'embarcació en qüestió no disposa de orsa, timó ni botavara, s'observarà que les maniobres bàsiques de navegació de qualsevol embarcació de vela lleugera canvien la seva metodologia d'implementació quan es tracta d'un Patí.

Quan es parla de maniobres bàsiques, es parla generalment de les maniobres de gir (orsar i arribar) maniobres de canvi de direcció (virada i trabujada) i maniobres d'arribada i sortida de port o platja, entre d'altres.

A continuació, s'exposaran les maniobres bàsiques de navegació d'un Patí de Vela:

5.2.1 Maniobres de gir i canvi de direcció

La gran diferència de govern entre les embarcacions de vela lleugera i el Patí de Vela, rau en les **maniobres de gir** d'aquest.

Donat que el Patí de Vela no disposa de timó, s'utilitzarà el moviment del pes del tripulant al llarg dels flotadors, per a dirigir l'embarcació cap al costat on vingui el vent (orsar) o cap al costat contrari (arribar). A continuació s'explicaran ambdós maniobres:

- Per a dirigir la proa de l'embarcació cap al costat d'on vingui el vent (orsar), el moviment del tripulant haurà de ser de posició normal⁷ cap a proa.
- Per a dirigir la proa de l'embarcació cap al costat oposat d'on vingui el vent (arribar), el moviment del tripulant haurà de ser de posició normal cap a popa.

Pel que fa a les **maniobres de canvi de direcció**, la virada i la trabujada, també es basen amb el principi anterior de desplaçar el pes del tripulant entre proa i popa, però totes dues portades a l'extrem. Quan es tracta de **virar**, es porta tot el pes del tripulant a la proa i s'espera fins que la vela canviï de costat (tal i com es pot observar en la *Figura 8*). Altrament, quan es parla de **trabujar**, el pes del tripulant s'ha de portar al màxim a la popa del Patí possible i, en casos de poc vent, fer us dels peus com a eina de gir (aquests s'hauran de col·locar en contacte amb l'aigua al costat indicat i mitjançant la fricció amb la superfície del mar s'aconseguirà acabar el gir).

⁶ **Governar**: Acció de guiar o dirigir, molt utilitzat en el món de la nàutica.

⁷ **Posició Normal**: Posició compresa entre les bancades 4 i 5 en l'eix longitudinal del Patí, que s'adopta en navegació constant (quan no es manobra).

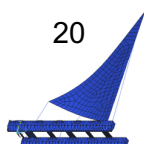




Figura 8: Patí de vela orsant

5.2.2 Sortida i arribada

Es parla de sortida i arribada a platja, ja que generalment aquest tipus d'embarcacions descansen en clubs delimitats per parcel·les situades a les platges.

La sortida i la arribada a platja, en el cas d'un Patí de Vela, es realitza de forma totalment perpendicular a aquesta i obrint la vela el màxim per a reduir la velocitat amb la que s'hi arriba. També s'utilitza particularment una maniobra, en cas de fort onatge, que consisteix en que el tripulant salta de l'embarcació just abans d'arribar a la platja i tot seguit agafa la barra d'escota fortament per acompanyar el Patí i evitar que bolqui al arribar.

5.2.3 Altres

Existeixen altres maniobres de funcionament del Patí de Vela per a navegants més experimentats

Una d'elles consisteix en la possibilitat de variar l'angle d'inclinació del màstil. Aquesta maniobra s'utilitza per a guanyar velocitat depenent del rumb de navegació que s'està portant. Per exemple, en cas de voler mantenir un rumb de cenyida (quasi contrari al vent), s'haurà de d'inclinar el màstil fins a uns 70° cap a popa.

També existeixen altres recursos de navegació com abaixar o pujar la vela per evitar una escora⁸ excessiva.

Per últim, és necessari comentar la gran facilitat de muntatge que mostra el Patí respecte a les demés embarcacions de vela lleugera. Aquesta maniobra consisteix bàsicament en pujar la vela per la guia del màstil i tot seguit posicionar-hi el cap d'escota amb els nusos i per les politges pertinents.

⁸ **Escora:** Inclinació d'una embarcació per acció del vent.

6 Situació d'estudi

A l'hora de realitzar un estudi d'esforços en una embarcació que, tot i la seva simplicitat, no deixa de ser un vehicle aquàtic de grans dimensions, és imprescindible parametritzar una situació d'estudi concreta; en altres paraules, s'hauran de concretar unes condicions específiques per a l'estudi que hauran d'assimilar-se al màxim a una situació de navegació real. Aquesta situació però, haurà de posar a l'extrem l'embarcació en qüestió, de manera que es puguin observar els majors esforços impresos en l'estructura.

Al llarg d'aquesta secció s'exposaran els següents punts:

- 1) Rumbs de navegació assequibles per un Patí de Vela.
- 2) La importància de la inclinació o escora del Patí.
- 3) Forces externes involucrades en l'estudi.



6.1 Situació de navegació

En aquest punt s'exposaran les dues condicions que posicionen un Patí de Vela en una condició específica de navegació: el rumb i la inclinació o escora.

6.1.1 Rumb de navegació

Pel que fa a la direcció o rumb de navegació d'una embarcació a vela, aquest sempre dependrà de la direcció del vent. Per tant, serà indiferent l'objectiu on es vulgui arribar, ja que en funció del vent, la seqüència òptima de rumbos serà totalment diferent. En la *Figura 8* es poden observar els diferents rumbos nàutics suposant que el vent prové de la fletxa blava.

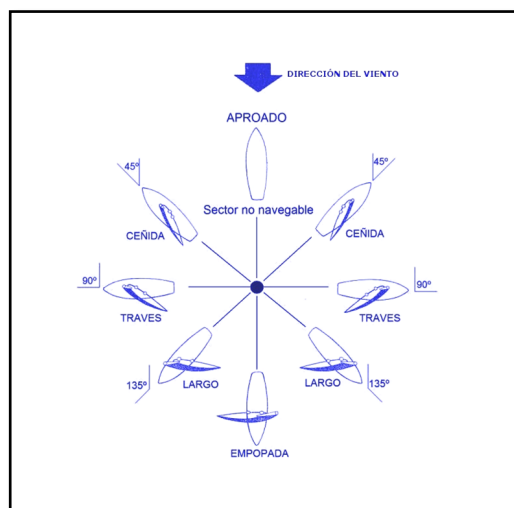
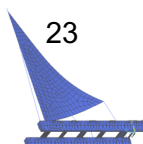


Figura 9: Diferents rumbos de navegació en funció del vent

Donat que en el present treball s'està buscant parametritzar la situació més crítica de navegació, a continuació es desglossaran els rumbos més típics de navegació:

- 1) **Cenyida:** consisteix en navegar en sentit oposat al vent però mantenint un cert angle amb aquest, permetent així que l'embarcació avanci.
- 2) **Empopada:** consisteix en navegar en el mateix sentit i direcció que el vent. Per a fer-ho, cal obrir molt la vela i així permetre la incisió del vent.
- 3) **Llarg:** consisteix en navegar en el sentit del vent però mantenint un cert angle amb aquest de manera que la incidència a la vela sigui major. Es tracta del rumb on s'obtenen majors velocitats amb el Patí de Vela.
- 4) **Través:** consisteix a navegar totalment perpendicular al vent, obtenint així el major volum de vent incident. Es tracta del rumb on s'obtenen majors escores seguides d'altres velocitats.



Tanmateix, tenint en compte que es tracta d'un treball on es vol posar a prova la resistència de l'embarcació, sembla evident que el rumb més indicat per estudiar sigui aquell on s'obtenen majors càrregues de vent, és a dir, el **través**.

6.1.2 Inclinació

Tal i com passa amb d'altres embarcacions de tipus catamarà, la alta velocitat de navegació del Patí de Vela es basa en el fet de reduir la meitat de les friccions degudes al mar al produir-se el fenomen de la escora.

Es per això que la situació que s'estudiarà d'ara en endavant, posicionarà el pla de l'embarcació⁹ a una certa inclinació respecte del pla horitzontal que forma el mar. Tanmateix, caldrà especificar-hi un angle concret el qual correspongui a la situació on l'estructura experimenti els màxims esforços. Conseqüentment, per a trobar aquest angle es recorrerà més endavant a un procediment experimental en el qual es posaran a prova diferents inclinacions amb diferents pressions de vent, de manera que es pugui trobar la posició on el esforços siguin majors.

A continuació s'ha volgut realitzar un estudi teòric per aproximar un interval d'inclinacions possibles basant-nos en l'experiència real de l'embarcació. Així, s'exposaran una sèrie de condicionants que s'han considerat rellevants i, conjuntament amb la informació d'experts patinaires¹⁰, s'escollirà un interval d'inclinacions crítiques en el qual s'haurà de trobar el posterior resultat experimental.

Factors que afecten l'angle crític d'inclinació

- El volum de vent que deixa d'incidir directament a la vela quan el Patí es troba molt escorat (la estructura estarà eclipsant a la vela). Aquesta manca de vent provocarà una disminució de les forces resultants a l'estructura.
- La component normal del vent sobre la vela disminuirà a mesura que augmenti l'angle d'inclinació, i per tant la càrrega de pressió sobre la vela disminuirà a raó del $\cos(\text{angle d'inclinació})$.
- La component del pes format pel flotador aixecat i el tripulant que, en funció de la distància que manté amb el centre del flotador submergit, exercirà un moment d'inèrcia major o menor a tota l'embarcació.
- La possibilitat de fregament amb l'aigua degut a poca inclinació del flotador més elevat. Aquest factor podria afectar ja no només per una qüestió de pèrdua de velocitat (tema que no s'estudiarà) sinó perquè el fregament amb l'aigua estaria

⁹ **Pla de l'embarcació:** Pla horitzontal format pel conjunt de bancades i flotadors.

¹⁰ **Patinaires:** persones que practiquen la navegació amb Patí de Vela.



participant en la subjecció del flotador exterior, disminuint per tant la component del pes de la que es parlava en el punt anterior.

- Per últim, també s'ha considerat important donar a conèixer les situacions crítiques reals de navegació. Aquestes, succeeixen normalment en instants de molt vent (ratxes) i com a conseqüent, l'embarcació sol escorar generalment fins els quasi 40° - 45° , posició en la qual el tripulant aconsegueix el contrapès necessari per a equilibrar el Patí.

Tenint en compte tots els punts comentats, es planteja una situació on s'observa per una banda que la estructura no hauria d'assolir grans inclinacions donada la gran disminució de pressió del vent resultant, però contràriament tampoc seria bo que arribes a fregar l'aigua. En conclusió, es pot assegurar que l'angle òptim que es busca per a l'estudi estarà comprès entre els 5° i 45° aproximadament.

A continuació, en les *Figures: 10 i 11*, es poden observar diferents exemples d'inclinacions de navegació d'un Patí de Vela ordenades de menor a major angle.



Figura 10: PV amb una inclinacions de 0° i 45° aproximadament



Figura 11: PV amb una inclinació de 75° aproximadament

Cal esmentar que donat que tots els estudis que es realitzaran seran de caire lineal i estàtic, la situació de navegació que es pretén estudiar no serà possible de manera directe, donat que s'estaria deixant un grau de llibertat (en aquest cas, la rotació en l'eix del Patí) totalment obert a qualsevol moviment. Idealment si s'aconseguís igualar les diferents forces i pesos implicats en el sistema, s'hauria de poder arribar a una situació estàtica d'equilibri, però a la pràctica això resulta impossible d'aconseguir.

Com a conseqüent, s'ha ideat una manera d'aconseguir simular la situació d'estudi en les condicions establertes. Aquesta, es basarà en la incorporació d'un element auxiliar que elimini aquest grau de llibertat restant però a l'hora no jugui cap paper important en l'anàlisi. Aquest element s'explicarà en la fase de modelatge del Patí.



6.2 Forces involucrades

En aquest apartat es parlarà de les diferents forces externes involucrades en el sistema global a analitzar. Tanmateix, s'agafarà com a **sistema d'estudi** principal l'embarcació, entenent com a tal, el conjunt format per la base del Patí (flotadors més bancades), el màstil, la vela, l'eixàrcia i l'escota.

Per tal de trobar aquest conjunt de forces externes, s'estudiarà el **sistema entorn**. Aquest, serà el responsable de qualsevol afectació externa cap al sistema d'estudi i concretament el formaran: la força o pressió del vent i el pes i posició del tripulant. Aquests, s'analitzaran per tal d'aconseguir-ne valors numèrics que puguin ésser útils en un futur cas de simulació. Per últim, també tindrà una gran importància el pes propi de la embarcació, però aquest, serà estudiat en les posteriors fases de simulació.

6.2.1 Força de compensació del tripulant

En aquest apartat s'estudiarà la càrrega en forma de pes que exercirà el tripulant de l'embarcació per tal de contrarestar la força del vent. Aquesta, dependrà essencialment de dos paràmetres: la posició i el pes del tripulant (*Figura 12*).



Figura 12 : Posició de contrapès del tripulant

Mecànicament parlant, l'acció del tripulant provocarà per un costat una força puntual en la direcció de la gravetat i d'altra banda un moment d'inèrcia respecte l'eix en contacte amb el mar. A continuació es desglossaran cadascun d'aquests paràmetres:

- Pel que fa al **pes de tripulant**, aquest neix de la necessitat de voler contrarestar la inclinació de l'embarcació provocada per la força del vent. Per a fer-ho, l'usuari es col·loca en el flotador oposat a la vela, intentant allunyar al màxim el seu centre de masses del flotador oposat (el que reposa sobre l'aigua). D'aquesta manera, i probablement sense coneixement de la causa, l'usuari està augmentant el moment d'inèrcia respecte l'eix de recolzament.

Tanmateix, es prendrà una massa mitja de **80 Kg** donat que en les lliçons teòriques s'estipula un mínim d'uns 70 Kg per a poder dominar l'embarcació, però no es recomana pesar més de 100 Kg, ja que, podria resultar excessiu per a una embarcació tan lleugera.

- Respecte a la **posició del tripulant** al llarg de l'**eix longitudinal** del Patí, gràcies a informació d'experts patinaires i també per experiència pròpia, es clarament reconegut que la col·locació del tripulant es dona entre la última i penúltima bancada de l'embarcació (bancades 4 i 5).

Posició Longitudinal	Distància respecte la 4a bancada
entre bancada 4 i 5	A 25,83 cm

Taula 4: Posició del tripulant en l'eix longitudinal

- D'altra banda, pel que fa a la **posició del tripulant** en l'**eix transversal** del Patí, donat que aquesta dependrà de l'angle d'escora, es definiran quatre posicions genèriques per a les diferents escores: posició centrada, posició mitjanament centrada, posició mitjanament descentrada i posició descentrada. A continuació (*Taula 5*), es podran observar les posicions respectives a cada inclinació, on 65,4 cm és l'extrem del Patí i 25,7 cm la quarta part de la distància transversal.

Inclinació [graus]	Posició transversal	Distància respecte el centre
0	Centrat	25,7 cm
5	Centrat	25,7 cm
10	Centrat	25,7 cm
15	Mitjanament centrat	38,4 cm
20	Mitjanament centrat	38,4 cm
25	Mitjanament descentrat	51,9 cm
30	Mitjanament descentrat	51,9 cm
35	Descentrat	65,4 cm
40	Descentrat	65,4 cm
45	Descentrat	65,4 cm

Taula 5: Posició del tripulant en l'eix transversal, en funció de l'angle

Així doncs (tal i com es pot observar en les *Taules 4 i 5*), tot agafant les mesures exactes dels plànols del Patí, les posicions del tripulant en el pla del Patí seran: [654, 258.3].

En darrer lloc, per tal de modelitzar aquesta força i moments provinents del pes del tripulant, es col·locarà una partícula massissa, en la posició especificada. Aquesta, concentrarà tota la massa de l'usuari en un punt i d'aquesta manera resultarà més senzill de posicionar.



6.2.2 Pressió del vent

En el cas de la pressió resultant del vent, per tal de modelitzar-la correctament, primer s'haurà de considerar una velocitat del vent, després calcular-ne el seu equivalent en pressió (N/m^2) i per últim calcular-ne la seva component normal que dependrà de l'angle d'inclinació del Patí. A partir de certes inclinacions suficientment grans, també caldrà tenir en compte tot aquell flux de vent que queda eclipsat pel Patí al elevar-se i que, per tant, deixa d'incidir sobre la vela.

La **velocitat del vent** adequada per a cada inclinació es trobarà de forma experimental en la fase de simulació, on es buscarà aquell vent que mantingui a l'embarcació en equilibri.

A continuació es realitzaran els càlculs per a arribar a trobar les **pressions de forma genèrica**, i al final es mostrarà una taula de possibles exemples de velocitats.

Primer de tot caldrà convertir les velocitats de nusos a unitats del Sistema Internacional:

$$V_{vent} \left[\frac{m}{s} \right] = X \text{ nusos} \times \frac{0,5144 \frac{m}{s}}{1 \text{ nudo}} = X \cdot 0,5144 \frac{m}{s}$$

Després, s'utilitzarà qualsevol de les següents equacions equivalents de la mecànica d'estructures per al càlcul de la força resultant del vent:

$$F_{vent} [N] = \frac{1}{2} \times \rho \times S \times V^2 \quad \text{o} \quad F_{vent} [N] = \frac{1}{16} \times c \times g \times S \times V^2$$

- ρ : Densitat del vent (= 1,225 Kg/m³).
- V : Velocitat del vent en m/s.
- g : Gravetat (= 9,81m/s²).
- c : Coeficient eòlic (= 1 aproximadament).

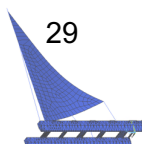
A continuació es mostrarà el càlcul de la pressió resultant del vent suposant una velocitat genèrica X .

$$Pressió [N/m^2] = \frac{1}{2} \times 1,225 \times X^2 = 0,6125 \cdot X^2 \text{ N/m}^2$$

$$Equivalent \text{ en } F_{vent} [N] = \frac{1}{2} \times 1,225 \times Sup \times X^2 = 6,872 \cdot X^2 \cdot Sup \text{ N}$$

Per últim, es realitzarà el càlcul de la component normal de la pressió sobre la vela també de forma genèrica en funció de la inclinació i del vent.

$$N_{Pressió} [N/m^2] = Pressió \times \cos(\alpha) = 0,6125 \cdot X^2 \cdot \cos(\alpha) \text{ N/m}^2$$



Tot seguit es podran observar en les *Taules 6 i 7*, de les diferents pressions totals en funció de la velocitat del vent en nusos i les **components normals de les pressions** del vent corresponents a cada angle ($N_{pr\alpha}$).

X [nusos]	V [m/s]	Pressió [N/m²]
5	2,57	4,06
10	5,14	16,24
20	10,29	64,94
25	12,86	101,47
30	15,43	146,12
40	20,58	259,77
45	23,15	328,77

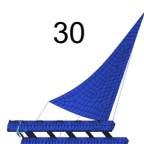
Taula 6: Pressions totals en funció del vent

V [nusos]	Npr10°	Npr15°	Npr20°	Npr25°	Npr30°	Npr35°	Npr40°	Npr50°
5	3,99	3,91	3,81	3,67	3,51	3,32	3,10	2,60
10	15,96	15,65	15,23	14,69	14,04	13,28	12,42	10,42
20	63,84	62,62	60,92	58,75	56,14	53,10	49,66	41,67
25	99,76	97,84	95,19	91,80	87,72	82,98	77,60	65,11
30	143,65	140,89	137,07	132,20	126,32	119,49	111,74	93,76
40	255,38	250,48	243,68	235,02	224,57	212,42	198,65	166,68
45	323,21	317,01	308,40	297,45	284,23	268,84	251,41	210,96

Taula 7: Components normals de les Pressions en funció del vent i la inclinació

Finalment, tal i com s'ha comentat anteriorment, per a casos amb inclinacions majors de 40-45 graus s'haurà de tenir en compte un factor extra en els càlculs de la pressió del vent. Efectivament, quan el Patí de Vela s'eleva excessivament provoca un efecte advers eclipsant la vela amb el propi cos del Patí.

Per a tenir en compte aquest fenomen, simplement s'haurà d'aplicar la pressió especificada sobre la regió d'àrea on realment incideixi el vent.



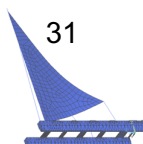
7 CAS BASE: Modelització i Simulació del patí de vela

El cas base del present treball englobarà tota la part practico-teòrica que s'ha dut a terme durant aquest treball. D'una banda, s'intentaran exposar tots els avanços pràctics aconseguits fins a la data, així com tots els coneixements teòrics obtinguts o necessitats durant el transcurs del projecte.

Donat que el present treball no proposava límit en extensió, i donava una proposta molt amplia d'estudi estructural del Patí de vela en general (sense objectius exclusivament concrets sobre l'estudi), sumant-li la situació actual de pandèmia global de l'any 2020 i les conseqüències a nivell pràctic que això ha comportat, el procediment que es seguirà en l'estudi base del projecte seguirà unes fases que ens transportaran al punt més llunyà arribat experimentalment fins la data.

Així doncs, el procediment experimental que seguirà l'estudi del cas base serà el següent:

1. En primer lloc, s'elaborarà un model tridimensional amb el software *SolidWorks*.
2. Tot seguit serà importat al programari *ANSYS Workbench* on es realitzarà un mallat global del model.
3. Després, s'exportarà a la versió *APDL d'ANSYS*, i és aquí on es començarà la extensa fase de modelització.
4. A continuació es simularà la situació modelitzada i s'intentarà trobar la situació més crítica possible variant la inclinació del Patí, la posició del tripulant i les càrregues del vent.
5. Per últim, s'analitzarà concretament la situació crítica trobada de forma global i parcial (cada component per separat).



7.1 Introducció al món de la Simulació: MEF

El funcionament en el que es basen els simuladors que s'utilitzaran al llarg d'aquest estudi (i molts d'altres) és el *Mètode dels Elements Finites* (MEF o FEA en anglès). Aquest, no deixa de ser un mètode de resolució de problemes numèrics que permet aproximar resultats d'equacions diferencials molt complexes [6].

El MEF utilitza com a estratègia principal la simplificació dels models matemàtics, però es en la forma en la que subdivideix la realitat en mallats d'elements i nodes que es diferencia de les altres metodologies de càlcul. En la *Figura 13* es poden apreciar els diferents components que formen l'estructura del món dels Elements Finites.

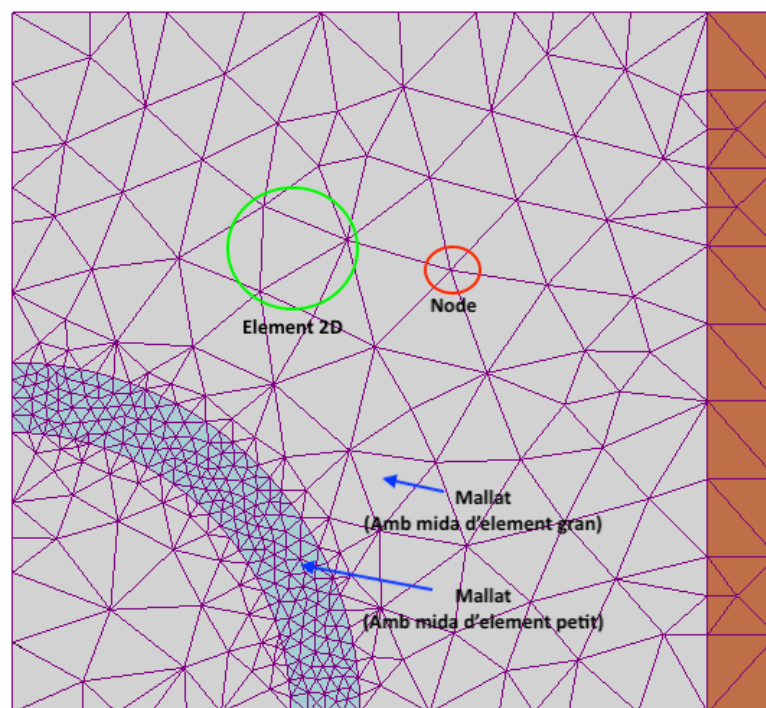


Figura 13: Exemple de mallat 2D amb els components principals del MEF

La idea principal del MEF, recau en partir d'una realitat purament geomètrica formada per volums, àrees, línies i punts, i traslladar-los al món dels elements finits. Això serà possible transformant-los en superfícies (2D) i volums (3D) constituïts per malles d'elements, que a la vegada estan constituïdes per unions de nodes. Per una millor comprensió, es podria dir que els elements finits a la vida real equivaldrien a una espècie de cèl·lules, cadascuna de les quals hi té associada una equació o domini molt simple i fàcil d'analitzar. D'aquesta manera, mitjançant computadors per a resoldre aquests petits dominis interrelacionats entre ells, es poden arribar a resoldre els càlculs numèrics associats a entitats geomètriques molt complexes.



7.2 Disseny amb SolidWorks

Per tal de poder realitzar un estudi general d'un Patí de Vela, és crucial tenir-ne un model tridimensional capaç de treballar amb l'eina de simulació que s'utilitzarà. Per això, al llarg d'aquest apartat s'exposaran els dos projectes de disseny que s'han realitzat amb l'eina SolidWorks amb l'objectiu d'ésser utilitzats en les posteriors simulacions.

7.2.1 Model Final 3D

En un primer moment, es va intentar aconseguir l'arxiu 3D original dels plànols del reglament oficial *ADIPAV*, contactant amb les diferents empreses editores dels plànols i també amb d'altres llocs webs dedicats a estudis o venda de patins de vela. Desgraciadament, cap dels contactats disposaven de tal informació.

Conseqüentment, es va decidir elaborar un model 3D amb el software SolidWorks que intentés aproximar-se al màxim als plànols oficials. Així doncs, es va decidir elaborar un model que simplifiqués els elements dedicats a fer del Patí una embarcació més ràpida durant la navegació, i es va prioritzar la conservació dels elements estructurals relacionats amb les transmissions d'esforços. D'aquesta manera s'aconseguiria un model fiable a nivell estructural, sense la dificultat d'elaborar un model geomètricament igual al original. Tanmateix, s'han realitzat les següents modificacions generals respecte dels plànols originals:

- S'han considerat els patins de secció constant quasi quadrada negligint els escurçaments de secció transversal al llarg de l'eix longitudinal. També s'han negligit molts arrodoniments d'arestes deixant el model final amb arestes simples i angles vius. A continuació (*Figura 14*), es podrà apreciar la simplicitat de les seccions simplificades dels flotadors del Patí.

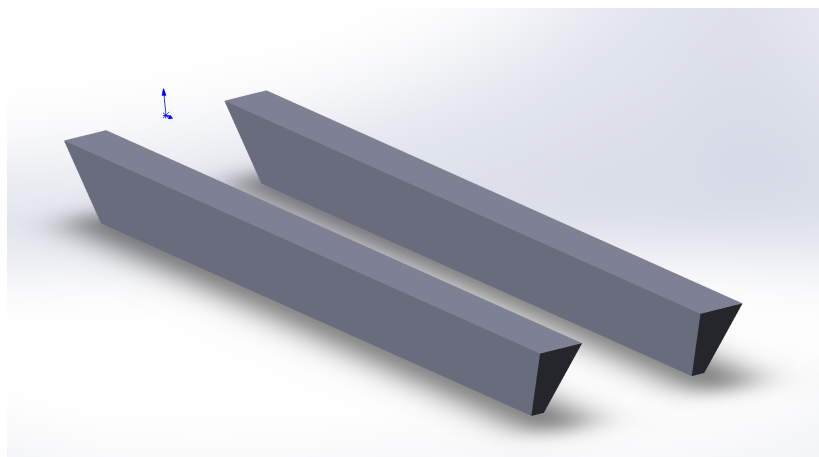


Figura 14: Patins o flotadors simplificats amb SolidWorks

- S'ha realitzat un disseny de la barra d'escota i del seu suport totalment simplificats, negligint-ne la curvatura i les geometries diverses del suport. Això ha estat possible degut a que la barra d'escota ha estat dissenyada únicament per a facilitar el canvi de costat de la vela en els moviments de canvi de rumb. Així doncs, en la posició que s'estudiarà, la escota es manté recolzada en un costat de la barra i per tant no afecten les geometries diverses que té aquest element a l'hora de fer l'estudi. En les següents *Figures 15 i 16*, es podran apreciar les diferències entre el disseny real i el simplificat.



Figura 15: Suport i barra d'escota real

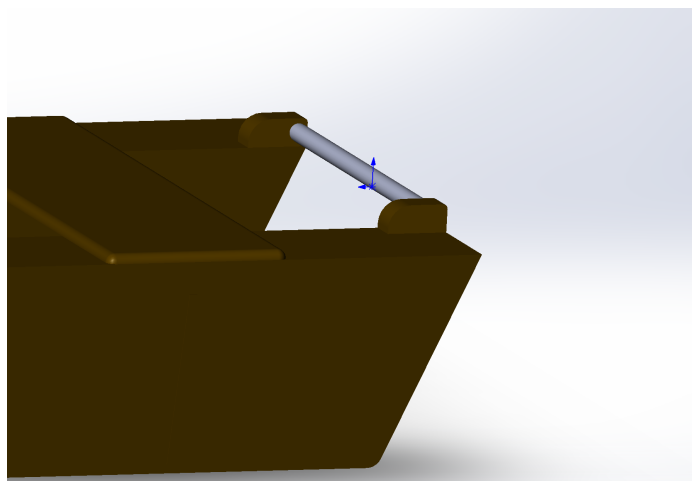
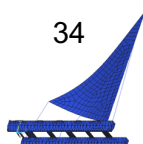


Figura 16: Suport i barra d'escota simplificats amb SolidWorks

- Respecte a la base del màntil (recolzada sobre la bancada de proa) tot mantenint les directrius que especifica el reglament, s'ha construït de forma molt simplificada negligint-ne tots els arrodoniments tal i com es pot apreciar en la *Figura 17*.



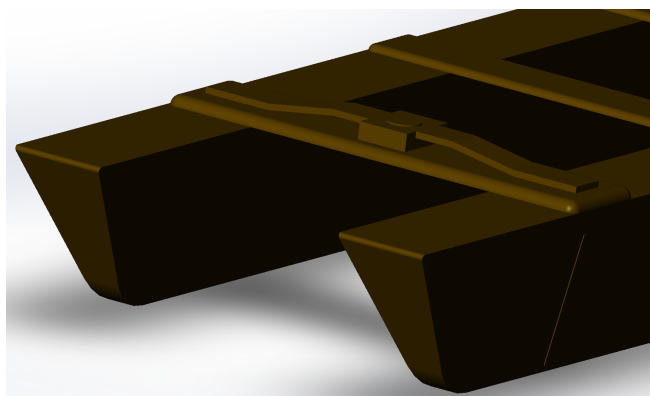


Figura 17: Suport de màstil simplificat amb SolidWorks

- Per últim, davant el desconeixement de la disposició i característiques de les quadernes internes dels flotadors, s'ha realitzat un càlcul aproximat de les dimensions d'aquestes sabent els volums màxims permesos en cada compartiment (informació del *Reglament Sènior* [2]). També amb l'ajuda visual de casos reals s'han pogut posicionar a una certa distància entre si. A continuació (Figures 18 i 19), s'observarà el resultat final del disseny d'aquests elements estructurals del Patí.

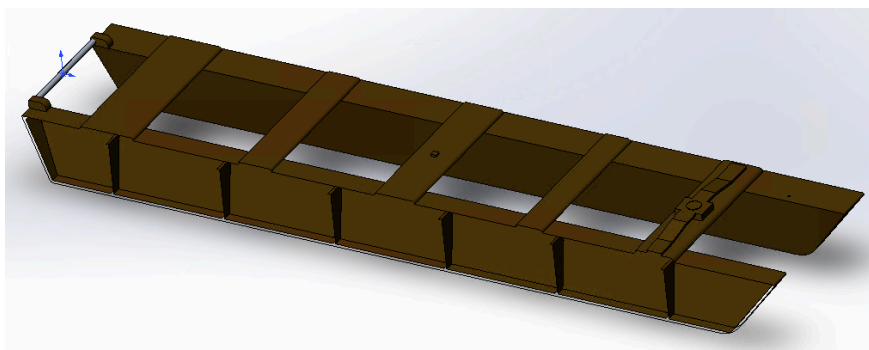


Figura 18: Vista general de les quadernes

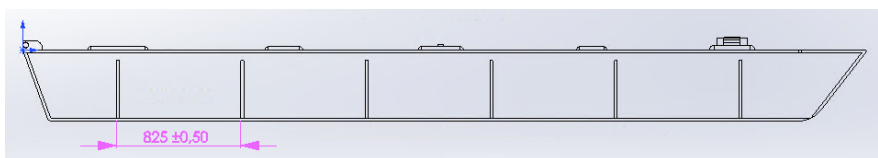


Figura 19: Vista lateral de les quadernes

Així doncs, tenint en compte totes les modificacions esmentades i la posterior adició d'alguns detalls purament visuals, s'ha arribat al disseny final del Patí que es mostra al tercer punt dels *Annexos* del treball desglossat en els diferents plans de visió.

Al segon punt dels *Annexos* també es podran trobar els plànols del disseny final adjuntats just després dels originals extrets de la pàgina web de referència *Adipav* [1].

7.2.2 Model Simplificat

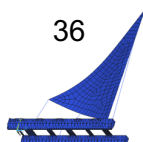
En aquest últim apartat del que ha estat el treball amb *SolidWorks* en el projecte, s'exposarà un disseny auxiliar que es va desenvolupar durant el transcurs del treball per a fer front a una sèrie de complicacions tècniques que més endavant seran explicades.

En primer lloc, es tractarà d'un disseny dimensionalment semblant al original, ja que tot i les múltiples simplificacions que es van realitzar, els elements estructurals presents mantenen les mides reals d'un Patí de Vela convencional. A continuació es desglossaran les principals diferències i característiques del model:

- Els flotadors estaran constituïts per dues bigues de secció constant quasi quadrada, massisses per dintre.
- Els elements com la barra d'escota i el peu de màstil, estaran simplificats fins al punt de no mantenir cap aparença en comú amb l'original, però tot i així, seguiran complint les seves funcions.
- Per últim, s'han obviat tots els elements de caràcter visual i decoratiu que es varen introduir en el model visual.

Cal comentar que donada la gran comoditat que aportarà aquest model a nivell de treball amb ANSYS, la gran majoria de simulacions i posteriors conclusions es basaran en aquest disseny.

Per concloure, el resultat en format visual d'aquest element auxiliar es podrà trobar al segon punt dels Annexos del projecte.



7.3 Treball amb *ANSYS Workbench*

Una vegada elaborat el model 3D, el següent pas requeria importar la peça al software de simulació *Mechanical APDL*. No obstant això, al veure que l'estructura era de caire massa complex com per a realitzar la primera operació de mallat, es va recórrer a l'eina o Software més modern: *ANSYS Workbench*. Aquest segon programa, gaudeix d'una interfície més intuïtiva i moderna que li donen grans avantatges en molts aspectes de l'actualitat davant el seu predecessor *ANSYS APDL*.

En el present treball, es va utilitzar aquesta nova eina per a començar una nova familiarització amb el món de la simulació realitzant petites proves i experiències però, essencialment, va servir per a facilitar la feina de mallat de l'estructura.

7.3.1 Mallat general

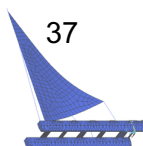
Un cop dominada l'eina de simulació, es va procedir a la realització de la operació de mallat de la peça tridimensional.

Per a fer-ho es va haver de realitzar una petita recerca per a saber quin era el millor format o extensió amb el qual s'havia de guardar el model per a poder-lo importar correctament. Finalment, després d'efectuar diferents proves, la única extensió que no va donar problemes va ser la *.STEP (Standard for the Exchange of Product Data)*, la qual serveix precisament per a situar dades tridimensionals en formats reconeguts per el programa de treball.

Una vegada importat el model 3D a l'*ANSYS Workbench*, es varen realitzar una sèrie de proves per assegurar-ne la compatibilitat. I, una vegada realitzades amb èxit, es va procedir a realitzar-ne un mallat.

Donat que es tracta d'un estudi sense antecedents coneguts, en el qual no es podia especular res, es va realitzar un mallat homogeni, automatitzat i sense refinaments. Tot i així, es va assegurar que la mida dels elements fos suficientment petita com per a poder estudiar les superfícies més estretes.

En un primer intent de realitzar el mallat global recomanat pel programa es va veure com el resultat eren elements de mides que superaven els espessors de molts elements del Patí. Per això, es va decidir de modificar els paràmetres d'aquest mallat automàtic.



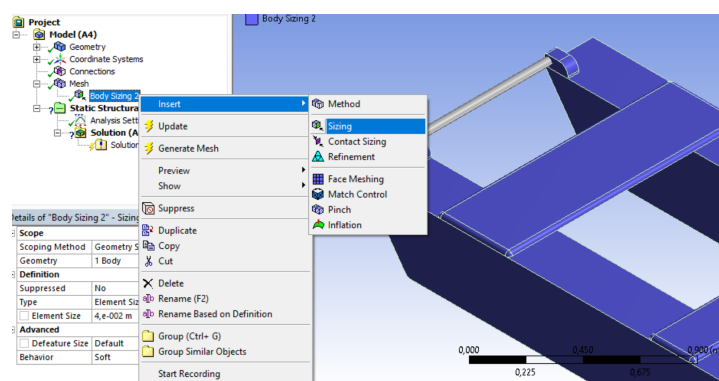


Figura 20: Mallat automàtic amb ANSYS WORKBENCH

Finalment, es va elaborar un mallat global amb mida d'element igual a 0,004 m el qual no resultava ni massa gran per el estudi, ni massa petit per a la posterior manipulació i càlculs de l'ordinador (com més petita la mida, més elements serien necessaris i com a conseqüent més càlculs per a l'ordinador). En les *Figures 21 i 22*, es pot observar el resultat final del mallat així com la mida i forma dels elements utilitzats.

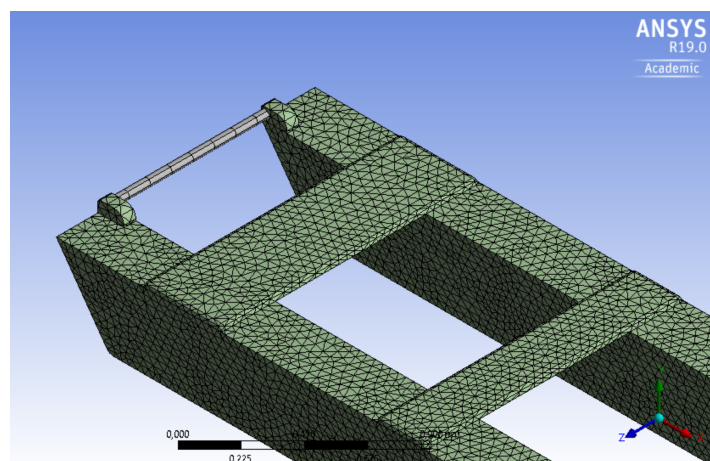


Figura 21: Patí amb un mallat de mida 0,04 m

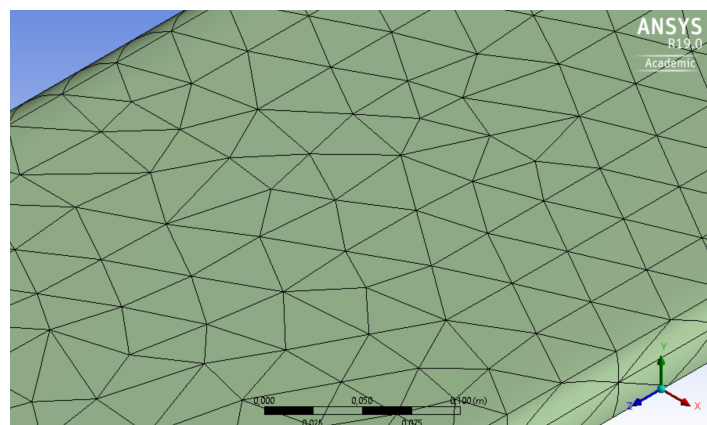


Figura 22: Ampliació d'una bancada



7.4 Transició al Software *ANSYS APDL*

Per a les posteriors fases de modelització i simulació, es va haver de moure tot l'estudi al programari d'*ANSYS* més complex anomenat *APDL*.

La transició del software *Workbench* al més antic, *ANSYS APDL*, es va realitzar per dues senzilles raons. D'una banda, es tracta del programa més utilitzat a l'escola d'enginyers (durant les sessions pràctiques de les assignatures *Resistència de Materials* i *Mecànica de medis Continus*) i per tant es el programari més dominat pel professorat i alumnat de l'escola. D'altra banda, tal i com s'ha esmentat anteriorment, tot i ser els nous programes més moderns, visuals i intuïtius, de vegades els manquen algunes funcions bàsiques plenament necessàries per a la realització del present treball.

Tanmateix, tampoc va resultar feina fàcil el procés de transició entre ambdós programaris. Per a fer-ho, es van haver de realitzar una sèrie de lliçons i recerca sobre el mecanisme d'importació d'*ANSYS APDL*, per a poder importar el model 3D amb el mallat realitzat anteriorment conservant certes propietats anteriorment aplicades.

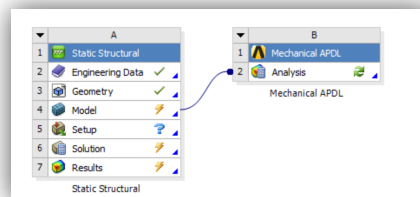
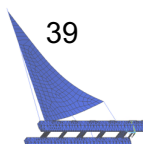


Figura 23: Transició del model mallat al Software Mechanical APDL



7.5 Treball amb ANSYS APDL: Introducció

En el següent apartat s'exposarà el funcionament del programari ANSYS APDL, el qual funciona d'una forma força cronològica i específica en comparació amb d'altres softwares de simulació. També s'exposaran una sèrie d'experiències que, igual que durant el treball amb *ANSYS Workbench*, es van realitzar per començar a familiaritzar-se i aprendre la correcta utilització del programari.

7.5.1 Funcionament

La Metodologia de funcionament de la versió *APDL* d'*ANSYS* es basa en seguir en ordre cronològic les diferents comandes que es mostren a la barra d'eines situada a la part esquerra de la interfície gràfica, tal i com es pot apreciar en la *Figura 24*. Així doncs, al llarg dels següents apartats s'exposarà el funcionament de cadascuna de les comandes o seccions bàsiques del programari que permeten arribar a modelitzar una figura específica i realitzar-ne la seva posterior simulació [4].

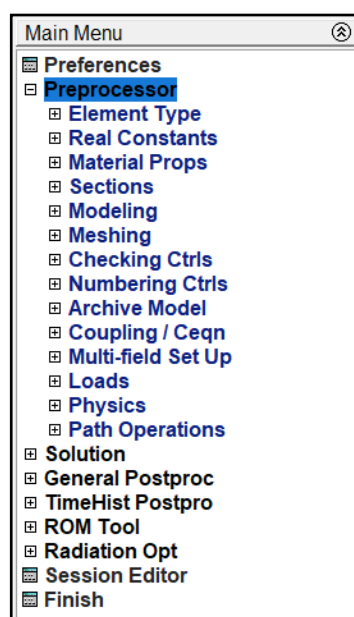
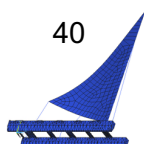


Figura 24: Menú principal d'ANSYS APDL

\Preferences

En l'apartat *preferences* és on selecciona el tipus d'estudi que es vol realitzar. Per exemple, en el cas de voler realitzar un estudi mixt que englobi un anàlisi estructural i tèrmic, s'haurien de seleccionar ambdues opcions *Structural* i *Thermal* a l'hora, tal i com es mostra en la *Figura 25*.



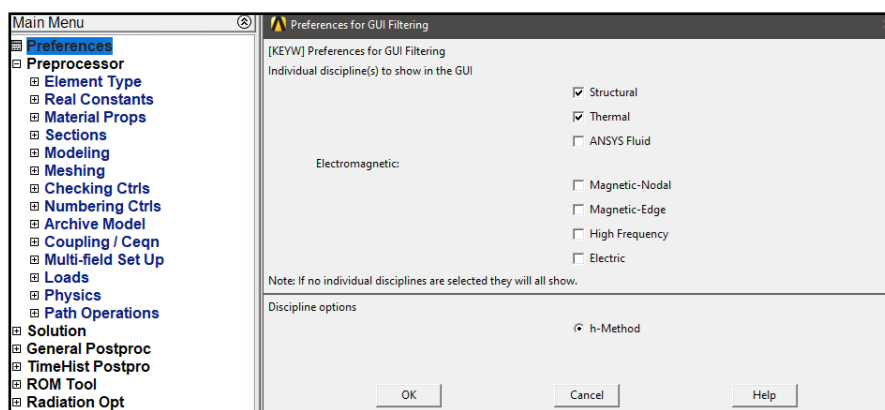


Figura 25: Exemple d'elecció de disciplina d'estudi

Preprocessor: Element type

Una vegada escollit el tipus d'estudi, el següent pas generalment recaurà en la modelització de l'objecte i situació a estudiar. Per a fer-ho, s'haurà d'obrir la pestanya *Preprocessor*, i tot seguit començar a realitzar els diferents punts que apareixen en ella de forma cronològica.

El primer punt, serà la definició dels elements finits que s'utilitzaran per a definir el model. Existeixen multituds d'elements, cadascun d'ells útil per a certes situacions. Aquests, es podrien classificar de moltes maneres, però les més habituals solen ser per nombre de nodes (des d'elements d'un i dos nodes fins a elements de vint) o bé per l'espai de treball (bidimensional o tridimensional).

En general, els elements més utilitzats (molts dels quals es faran servir en el present treball) són els següents: tipus *Solid* (per simular sòlids rígids), tipus *Link* (enllaç), tipus *Beam* (format de biga) i per últim, elements tipus *Shell* (capa o membrana). En la Figura 26 es poden apreciar els diferents elements citats en la pestanya de selecció del programari.

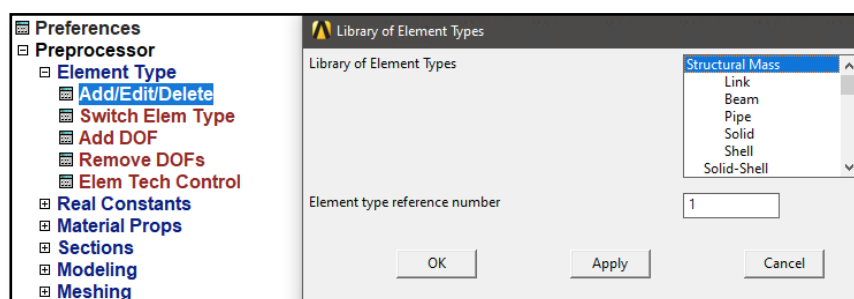
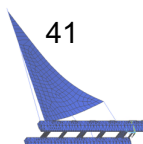


Figura 26: Finestra de selecció d'element



Per últim, una vegada seleccionada la classe i el tipus d'element, també s'hi podran variar certes característiques relacionades amb la interpretació matemàtica que li en donarà la computadora a l'hora de realitzar els càlculs.

Preprocessor: Real Constants i Sections

En aquests dos apartats s'acabaran de definir els elements anteriorment escollits, especificant-los des de propietats físiques (com densitat, massa, inèrcies i constants elàstiques) fins a característiques geomètriques (com diferents formes de seccions i característiques numèriques d'aquestes). Per exemple, en la *Figura 27* es pot observar la elecció de tipus de secció que se li donarà a una biga, podent-hi especificar les mides i el mallat d'elements que es disposarà (en concret, 12 elements en la direcció angular i 20 elements en la direcció radial).

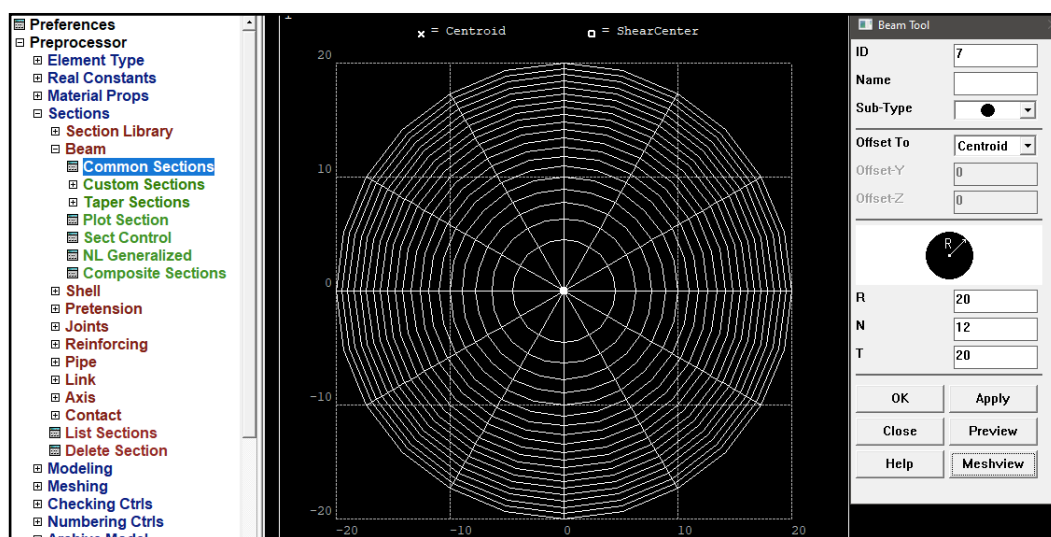


Figura 27: Definició de la secció d'una biga

Preprocessor: Material Properties

En aquest apartat, tal i com el seu nom indica, s'especificaran els diferents materials a utilitzar amb les seves corresponents característiques. Aquestes, dependran del tipus d'estudi que s'hagi escollit en l'apartat de *Preferences* i, tal i com s'ha explicat anteriorment, si es decideix elaborar un estudi estructural i tèrmic a l'hora s'hauran de donar característiques mecàniques i tèrmiques als materials seleccionats.

En un exemple bàsic d'anàlisi estructural, només caldria definir-ne la *Densitat* i, tractant-se d'un material isotròpic, el *Mòdul d'Elasticitat* (o de *Young*) i el *Coefficient de Poisson*. En la *Figura 28* es pot observar la definició de les propietats d'un alumini que, en tractar-se d'un material isotròpic, només caldrà definir-ne les dues anteriorment esmentades (EX i PRXY).



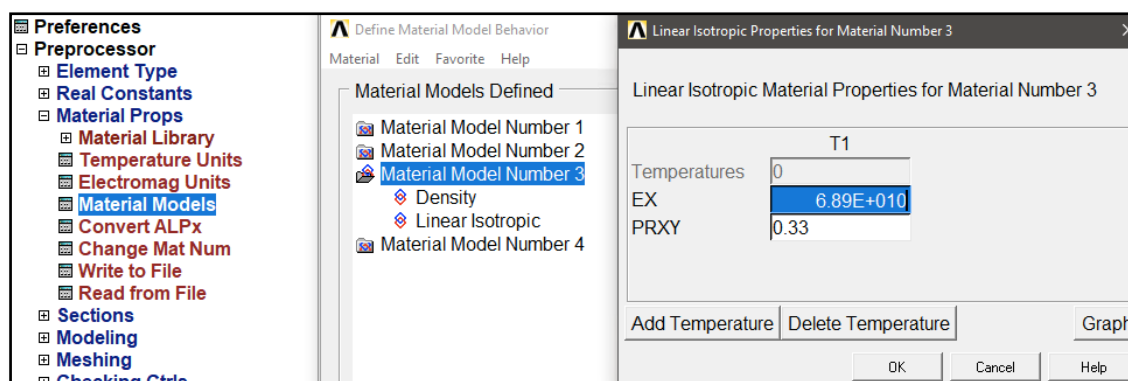


Figura 28: Definició de les propietats d'un Alumini

Preprocessor: Modeling i Meshing

Tant l'apartat *Modeling* com el següent *Meshing*, constituïran la gran part del treball de construcció del model i situació d'estudi de qualsevol projecte. De fet, serà aquí on es crearan o importaran les diferents formes geomètriques que posteriorment es transformaran en elements i nodes del model.

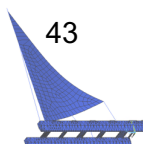
En l'apartat *Modeling* generalment es crearan els components geomètrics tipus Keypoints (punts), línies, àrees i volums, que definiran l'objecte d'estudi. Tanmateix, en el mateix apartat de modelatge també s'hi podran crear nodes (situant-los en l'espai cartesià o sobre els components geomètrics creats) i algun element finit de caire senzill (normalment definint unions entre nodes ja creats).

Serà en l'apartat *Meshing* on es crearan generalment els mallats i, d'aquesta manera, tots els elements finits i nodes de l'estudi. La metodologia es basarà en assignar a un component geomètric (com per exemple una línia) una sèrie de característiques de mallat, que en l'exemple de la línia, podrien ser el número de divisions (elements) continguts en la línia, o la mida del costat (*Edge* en anglès) de l'element. En les Figures 35, 36 i 37 de l'apartat d'exemples de pràctica d'APDL, es pot observar mínimament el funcionament dels apartats de mallat i modelatge.

Preprocessor: Loads

L'apartat de *Loads* englobarà el conjunt de forces i restriccions que s'aplicaran al model per acabar de definir les condicions de contorns i les cargues contemplades en l'estudi. Tanmateix, abans de definir qualsevol carga, s'haurà de definir el tipus d'anàlisi (estàtic, modal, harmònic...) que es vulgui fer tot clicant a la pestanya *New Analysis* i escollint la opció desitjada.

Generalment, aquest apartat servirà per a definir restriccions de desplaçament i/o forces i pressions. En la Figura 29 es pot observar una simple restricció nodal dels 6 graus de



llibertat existents (u_X , u_Y , u_Z , rot_X , rot_Y , rot_Z), i l'aplicació d'una força vectorial en una direcció específica del pla.

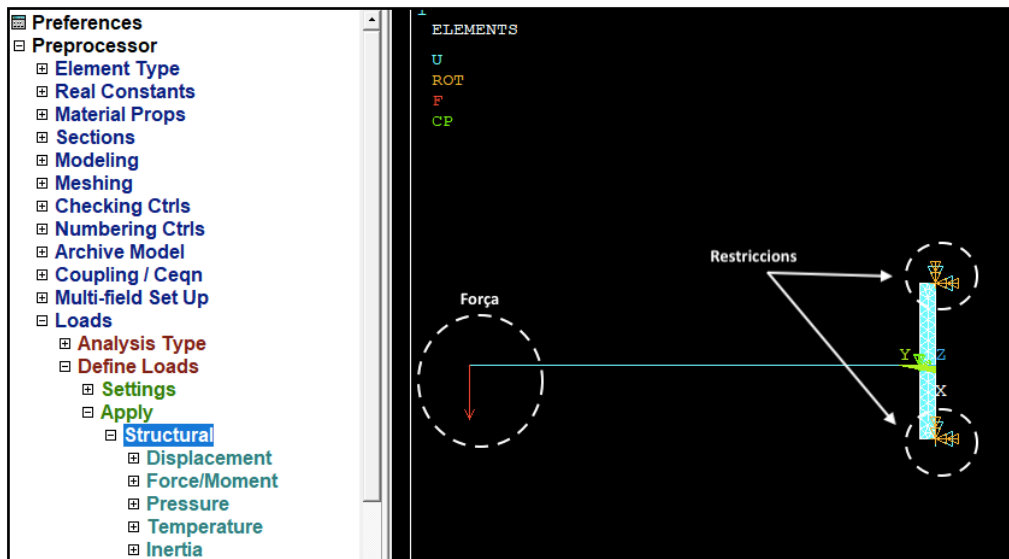


Figura 29: Exemple de restriccions i forces

Solution: Solve

En aquest penúltim apartat, s'executarà la comanda *Solve* perquè la computadora resolgui el problema matemàtic que existeix darrere de l'estudi, d'aquesta manera també podrem detectar l'existència de possibles errors en el model i poder-los corregir posteriorment. Una curiositat de l'apartat *Solution*, és que també es podrà optar per definir el tipus d'anàlisi i les càrregues directament i no caldrà fer-ho en l'anterior *Preprocessor*.

General Postprocessor

En aquest darrer apartat és on es visualitzaran tots els resultats referents al problema que s'hagi plantejat anteriorment. Així doncs, és aquí on generalment es prendran les diferents decisions i/o conclusions relatives a l'estudi. Un clar exemple de maneres de visualitzar o interpretar resultats en el *Preprocessor* són els gràfics (*Plots* en l'anglès). En la *Figura 30* es pot observar un clàssic exemple de gràfic de deformacions, on s'hi pot observar el model abans i després d'haver-hi aplicat certa força en un extrem i fixant-ne l'altre.



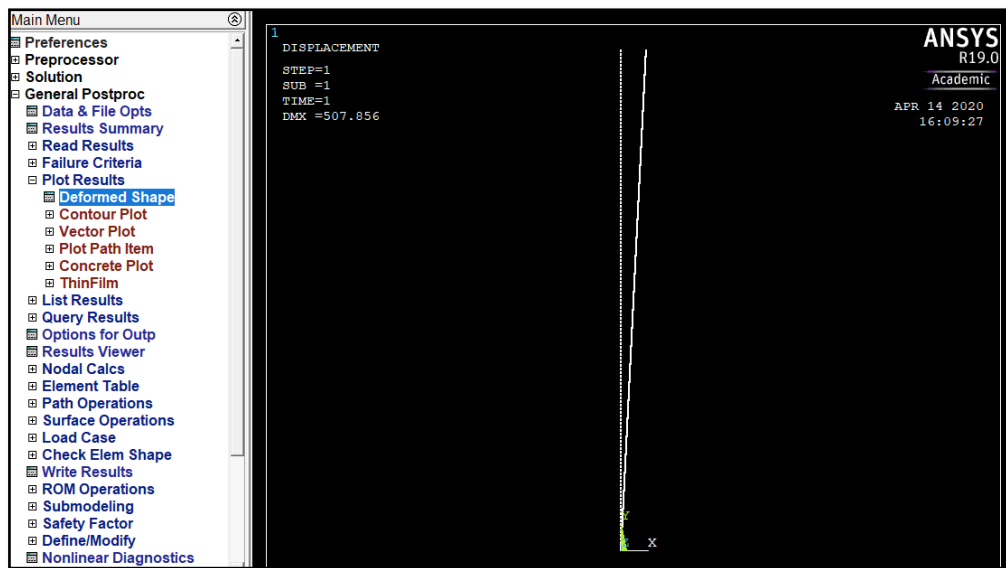
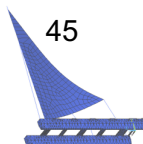


Figura 30: Plot de les formes deformada i no deformada d'una biga



7.5.2 Exemples

En aquest subapartat de introducció al software *ANSYS APDL*, s'exposaran una sèrie d'experiències que es van dur a terme durant la primera presa de contacte amb el programari. Primer de tot, s'explicaran un recull d'exemples bàsics de simulacions consecutives amb bigues i membranes (*Beams* i *Shells*) que es van dur a terme. Després, s'exposarà un petit projecte de modelatge que es va dur a terme amb un model 3D de Patí de Vela molt simple (anteriorment exposat en apartats anteriors).

Experiència 1

Aquesta primera presa de contacte es va basar en la simple creació d'un element tipus biga, al qual se li van aplicar una sèrie de càrregues. L'esbós de la pràctica es representarà en la *Figura 31*.

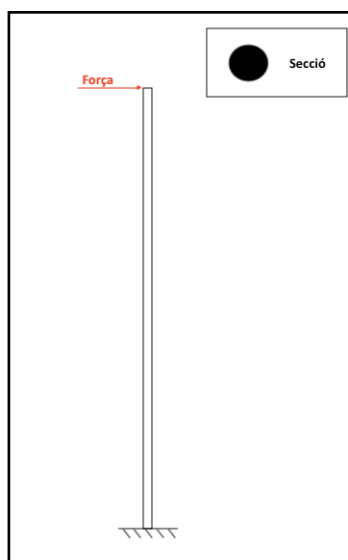
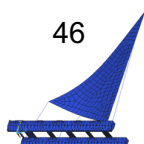


Figura 31: Esbós o croquis de l'experiència 1

El procediment va ser el següent:

- 1) Creació de l'element tipus Beam,
- 2) Especificar-hi una secció tipus barra circular massissa amb les especificacions numèriques: radi i divisions d'elements.
- 3) Creació del material i les seves propietats, més concretament acer.
- 4) Definir 2 nodes en l'espai i posteriorment assignar-hi l'element d'unió definit abans, amb les propietats de secció i material.
- 5) Definir un nou anàlisi de tipus estàtic i aplicar una restricció de tots els moviments a un dels nodes de l'element creat.
- 6) Aplicar una Força en la direcció perpendicular al eix de la biga.
- 7) Resoldre el problema estàtic amb la comanda *Solve*.



Finalment, observar els gràfics de desplaçaments, per comprovar el bon funcionament del model. En la *Figura 32* es poden observar ambdós gràfics mencionats.

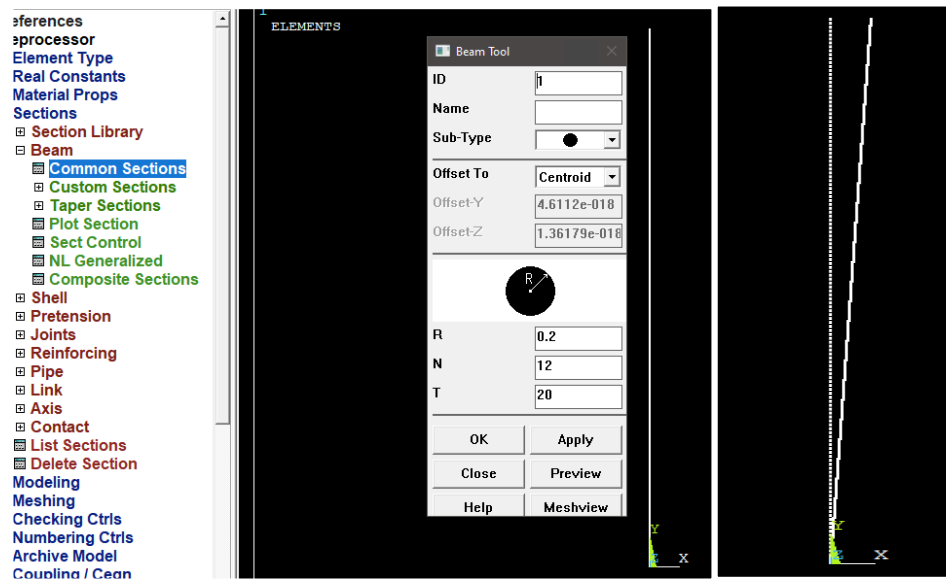
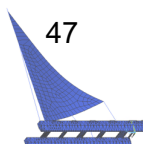


Figura 32: Definició de la secció de biga – Gràfics de Deformació i tensions en l'eix x



Experiència 2

En aquesta segona pràctica, es continuarà en la línia de l'experiència 1, però aquesta vegada incorporant-hi un nou element tipus *Shell* que modelitzarà un espècie de vela, la qual s'unirà a la biga mitjançant unions de tipus *Coupling* (acoblament de punts). Clarament es pot notar com la elecció d'aquestes experiències ha anat molt relacionada amb l'objecte d'estudi del treball, el Patí. En la *Figura 33* es pot observar un senzill esbós del que serà l'objectiu de l'experiència.

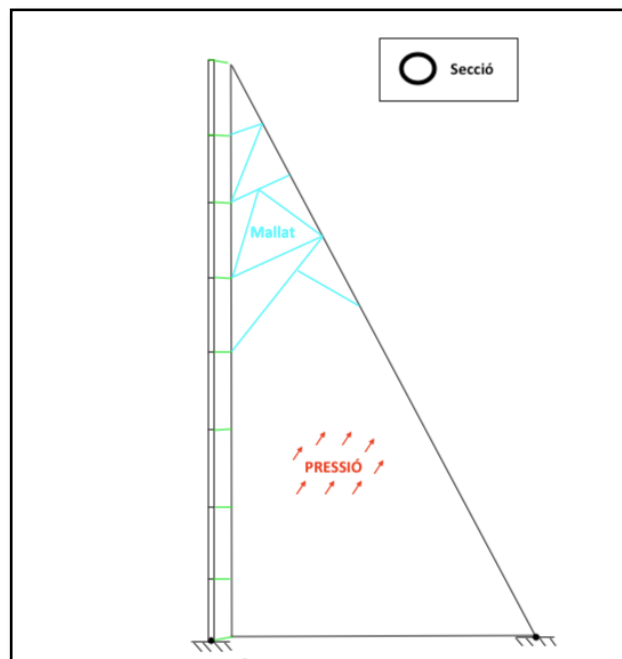
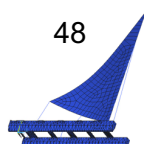


Figura 33: Esbós o croquis de l'experiència 2

Tanmateix, en aquest segon cas, les operacions que s'han realitzat són les següents:

- 1) Crear i definir l'element *Beam* de l'experiència 1.
- 2) Modificar la secció de l'element *Beam* donant-li una nova forma de tipus circular buida. S'assignaran uns nous radis interior i exterior per a la secció.
- 3) Definir l'acer utilitzat en l'experiència 1.
- 4) Crear un nou element tipus *Shell* amb la seva corresponent secció indicant el seu gruix.
- 5) Crear un nou material de menys rigidesa com és ara el *Nylon*, que es pugui utilitzar per modelitzar una membrana.
- 6) Modelitzar la biga en l'espai, utilitzant *Keypoints* i *Lines*, per a poder subdividir aquest element en múltiples divisions de nodes.
- 7) Definir en l'espai un conjunt de 3 *Keypoints* formant un triangle rectangle. Després, crear tres línies d'unió entre els punts i, per últim, definir l'àrea compresa entre tals línies.
- 8) Definir un nou mallat per l'àrea amb el mateix nombre de divisions que la biga.
- 9) Establir unions de tipus *Coupling* entre els nodes de la vela i els de la biga.



- 10) Assignar dues restriccions de moviment total, un a la base de la biga, i l'altre a l'extrem de la vela més allunyat de la biga.
- 11) Aplicar una pressió sobre la superfície vèlica.

Per últim, es podrà visualitzar (*Figura 34*) el disseny modelitzat amb totes les condicions establertes i el gràfic de desplaçaments després d'aplicar-hi la pressió.

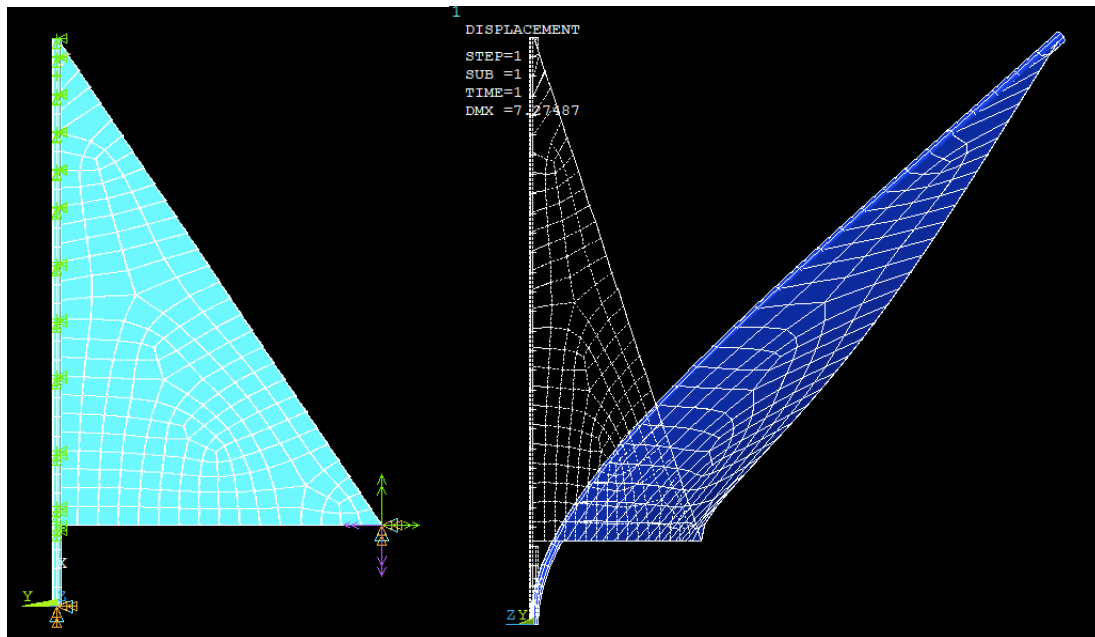
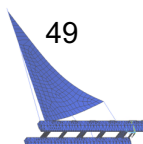


Figura 34: Model abans i després d'aplicar-hi la pressió



Projecte Patí Simplificat

La idea d'aquest petit projecte com a pràctica, va sorgir durant un dels processos de modelització del cas base del Patí. Treballar amb el model 3D complet del Patí, resultava molt problemàtic en la majoria de processos de modelatge en l'ANSYS APDL, doncs aquest sovint es paralitzava quedant congelada la pantalla, fet que donava lloc al posterior tancament automàtic del programa. Aquesta situació es repetia constantment perdent així la gran part dels continguts avançats.

Conseqüentment, es va decidir construir un model molt més simplificat que el que s'estava utilitzant per a realitzar tota la fase de modelització. D'aquesta manera, la computadora podria treballar amb menys volum de dades, i es podria continuar utilitzant la metodologia de prova-error sense col·lapses del programari. El petit projecte acabaria una vegada s'arribés al model final, cosa que significaria tenir el coneixement suficient com per poder modelar el model original sense errors ni col·lapses.

A continuació s'exposaran breument i de forma visual les etapes d'aquest avant-projecte. La explicació de cadascuna de les etapes s'explicarà convenientment en la fase de modelatge del model original.

Fase 1: Mallat de la base del Patí, creació del mànstil i definició de l'eixàrcia

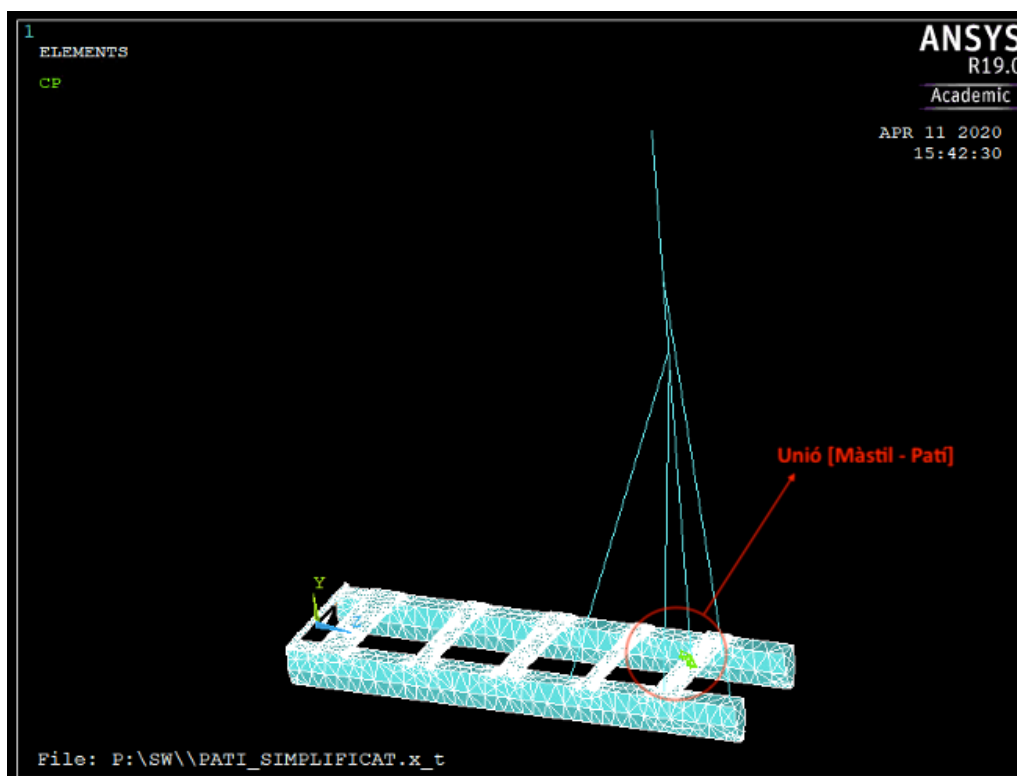
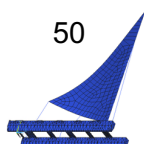


Figura 35: Model Patí Simplificat, fase 1



Fase 2: Disseny i mallat de la vela

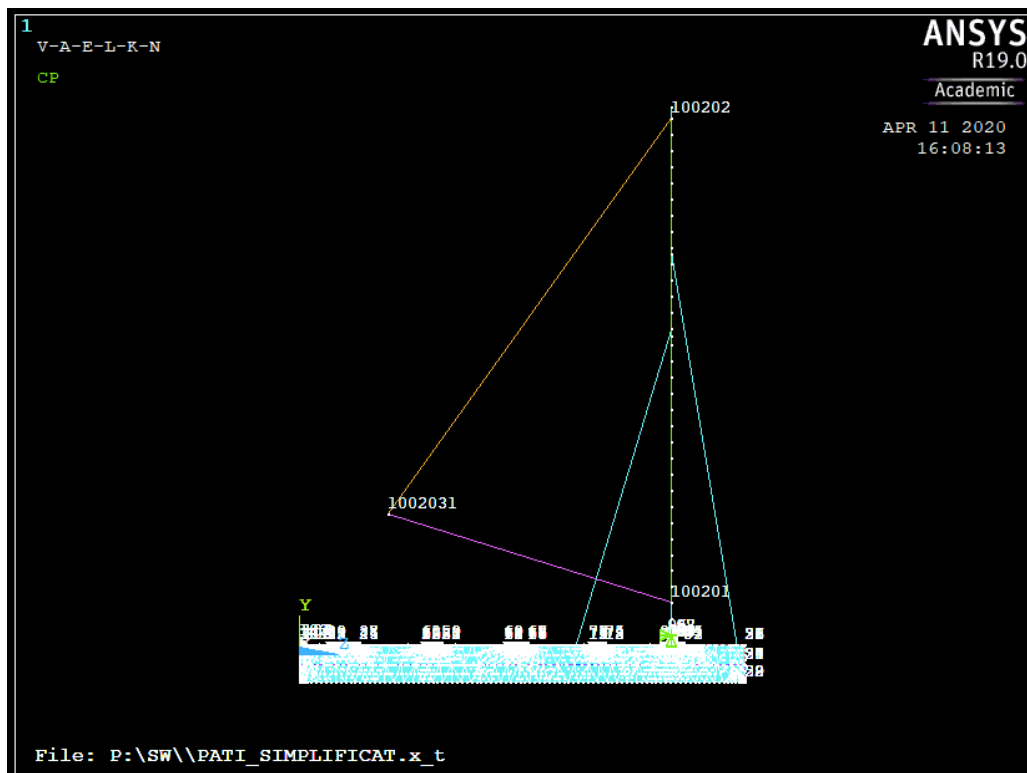


Figura 36: Model Patí Simplificat, fase 2: disseny de la vela

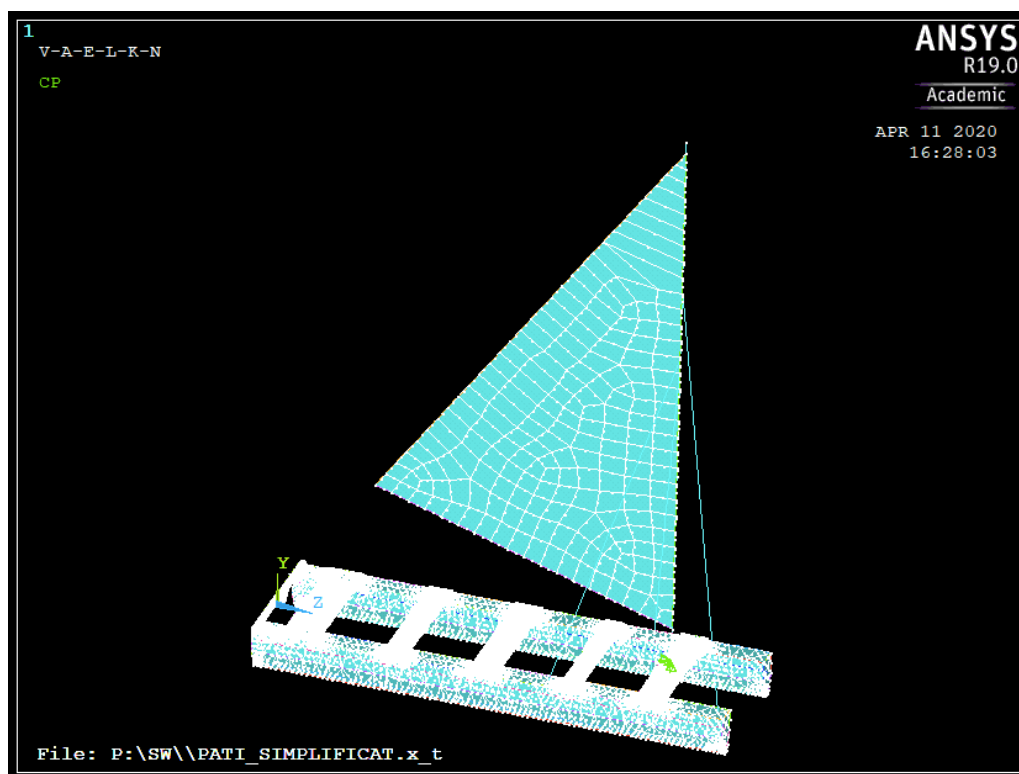
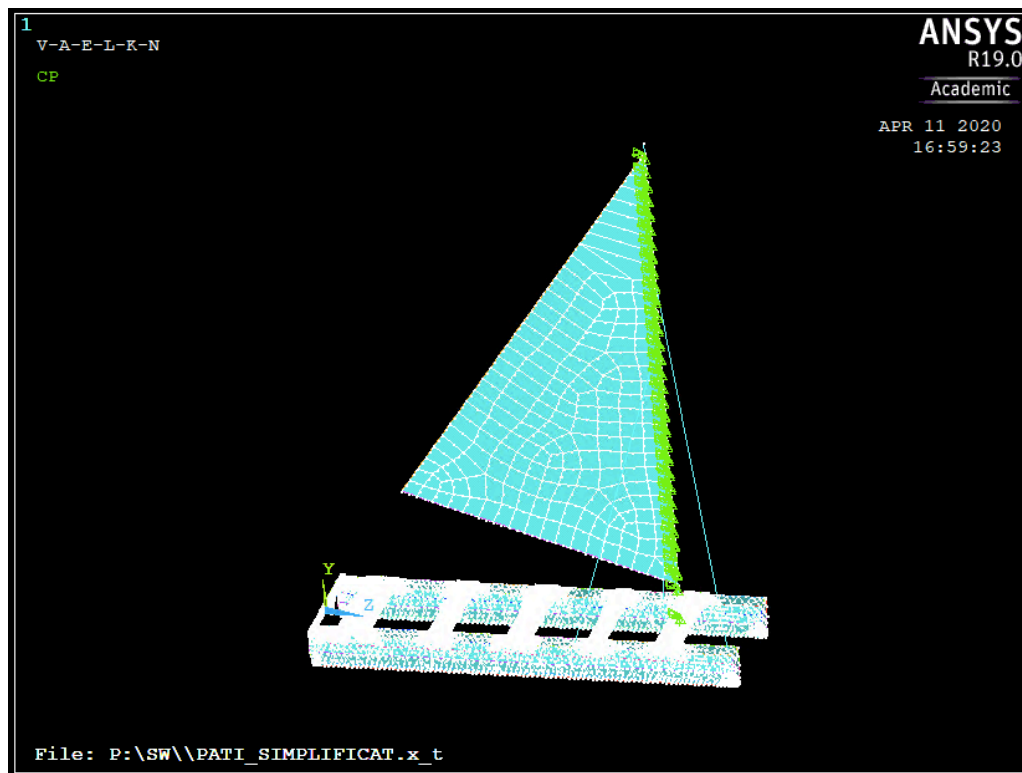
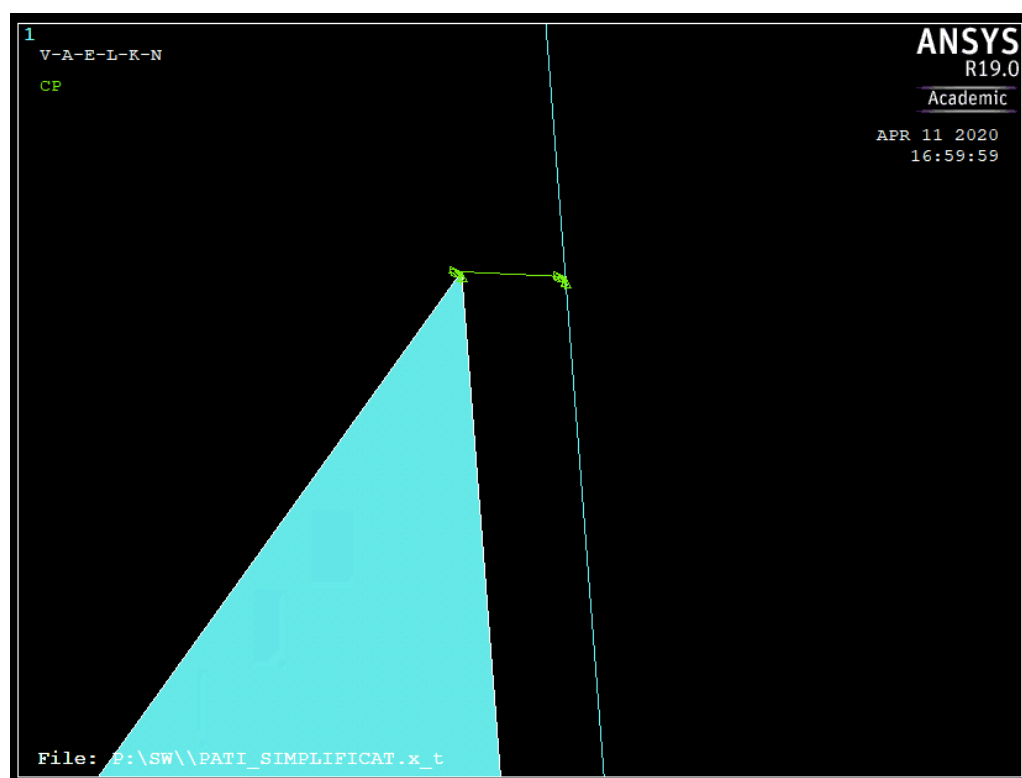
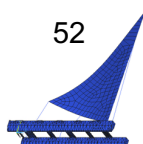
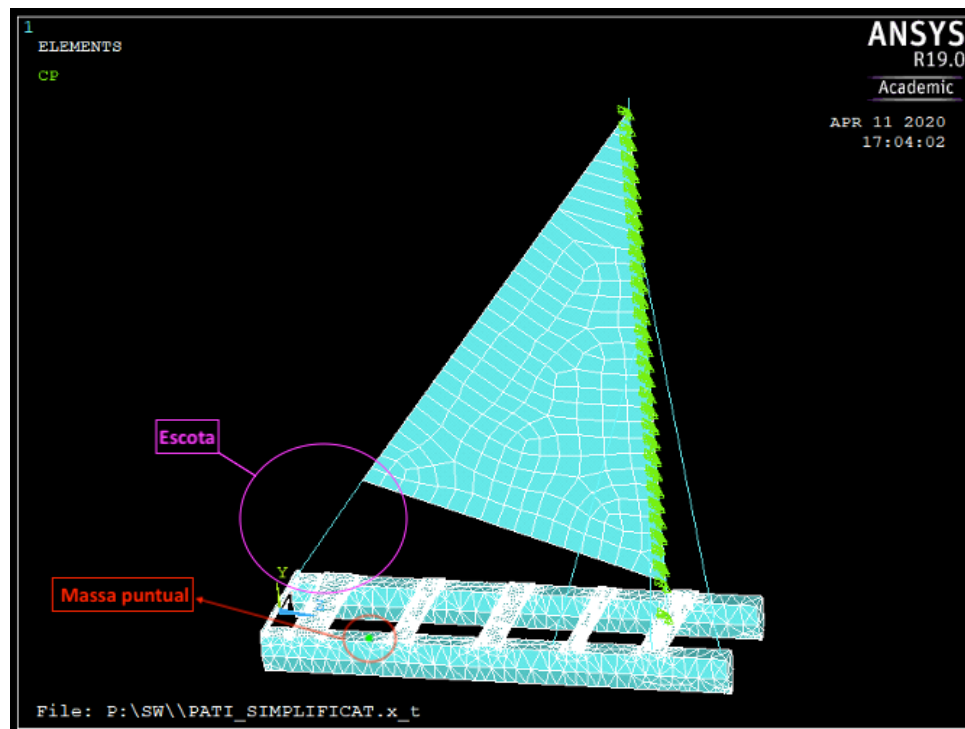
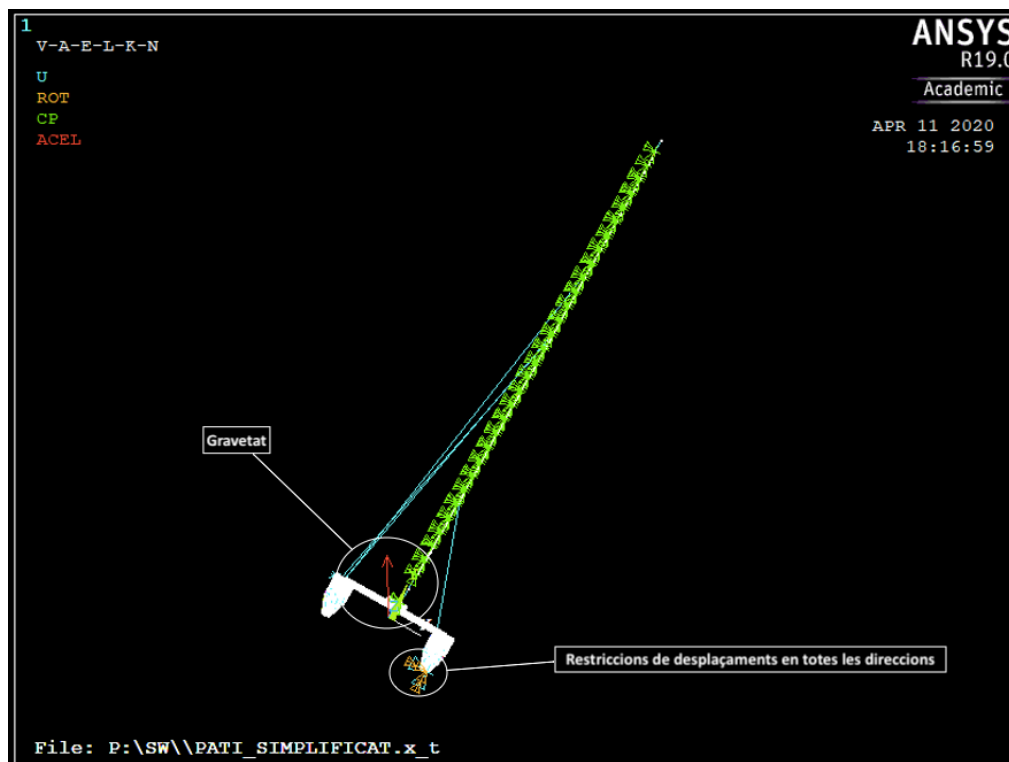
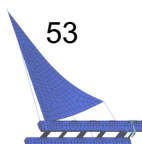


Figura 37: Model Patí Simplificat, fase 2: Mallat de la vela

Fase 3: Unió del mànstil amb la vela*Figura 38: Model Patí Simplificat, fase 3**Figura 39: Elements d'acoblament (Coupling)*

Fase 4: Incorporació de l'escota i la massa puntual*Figura 40: Model Patí Simplificat, fase 4***Fase 5: Incorporació de la gravetat i restriccions de mobilitat en un flotador***Figura 41: Model Patí Simplificat, fase 5*

Fase 6: Creació d'un element de subjecció del patí flotant i aplicació d'una càrrega sobre el pla vèlic

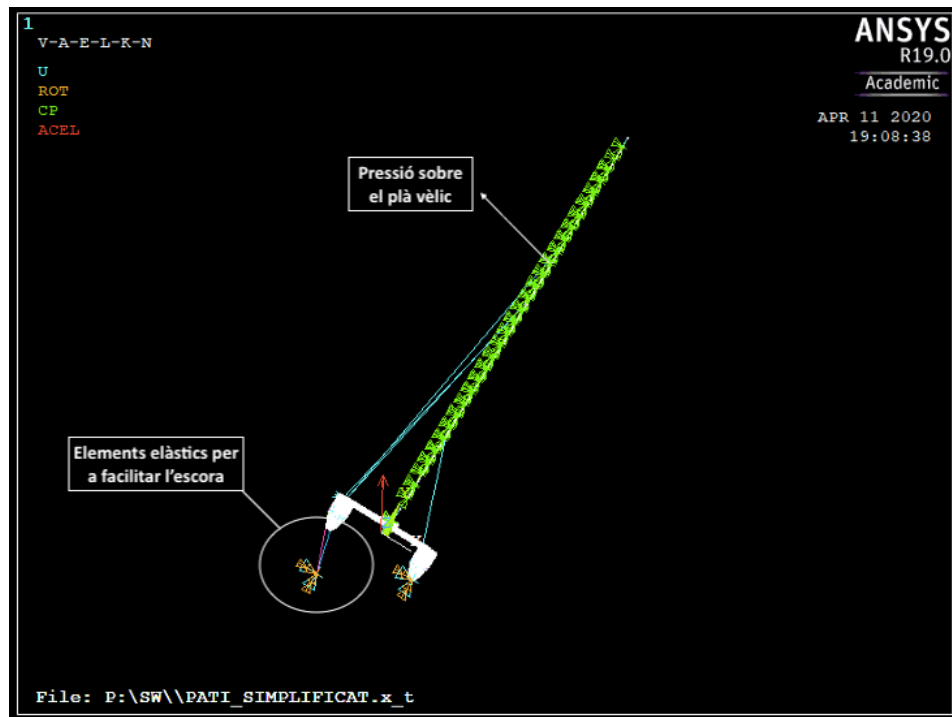
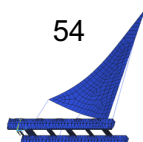


Figura 42: Model Patí Simplificat, fase 6

Una vegada arribat a aquest punt i després haver comprovat la correcta resolució del problema (amb la comanda *Solve*) observant que no hi ha errors de modelatge, ja es podrà començar el treball amb el model complet del Patí.



7.6 Treball amb ANSYS APDL: Propietats dels materials

Una vegada familiaritzats amb el programari d'ANSYS versió APDL, el següent pas englobarà tota la feina de modelització del sistema d'estudi. Tanmateix, s'ha cregut necessari incorporar primer el següent apartat on es desglossaran, un per un, els materials que s'utilitzaran durant el modelatge.

Certament, la metodologia cronològica real que es va seguir duran el treball, no va començar per la definició dels materials sinó que es va optar per definir materials genèrics per a poder prosseguir amb el treball i posteriorment poder redefinir i concretar correctament cadascun dels materials i propietats d'aquests. Tanmateix, a continuació s'exposarà tota la fase de definició dels materials.

Material 1: Fusta contraxapada GL-36

Donada la complexitat de l'estructura del model tridimensional ja comentada amb anterioritat, es va decidir utilitzar un sol tipus de fusta per a tots els components estructurals basats en alguna de les fustes comentada en l'apartat de *Materials* (donada la multitud d'elements finits que constituïen cada component, resultaria impossible definir-ne el material un per un). D'altra banda, actualment el tipus de fusta utilitzat en cada secció depèn molt del fabricant i com a conseqüent s'ha escollit com a fusta genèrica per a tots els components el contraxapat GL-36, un dels més utilitzats.

- Per a modelitzar el *Material 1*, donat que és d'origen ortotròpic, les úniques propietats que diferiran numèricament i per tant s'hauran d'especificar seran les dels eixos x i y (referencia local).

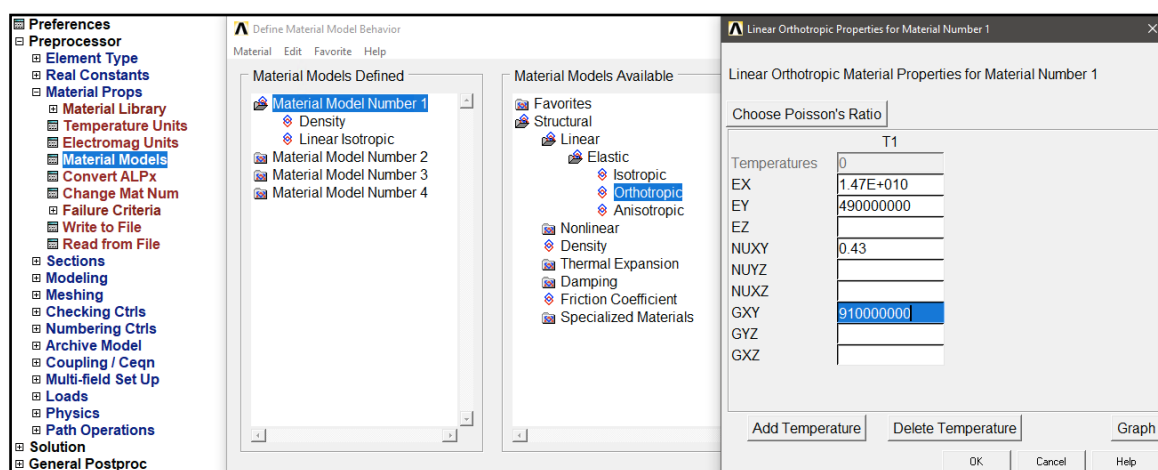
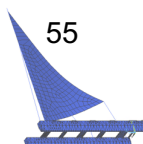


Figura 43: Definició propietats Fusta GL-36



Material 2: Acer Inoxidable

En el cas del *Material 2*, se li assignaran les propietats de l'*Acer Inoxidable* exposades anteriorment.

- El *Material 2*, serà utilitzat per modelitzar la barra d'escota i els cables de l'eixàrcia.
- Per a modelitzar el *Material 2*, només caldrà definir la seva densitat, *Mòdul d'Elasticitat* i *Coeficient de Poisson*, ja que es tracta d'un material isotròpic.

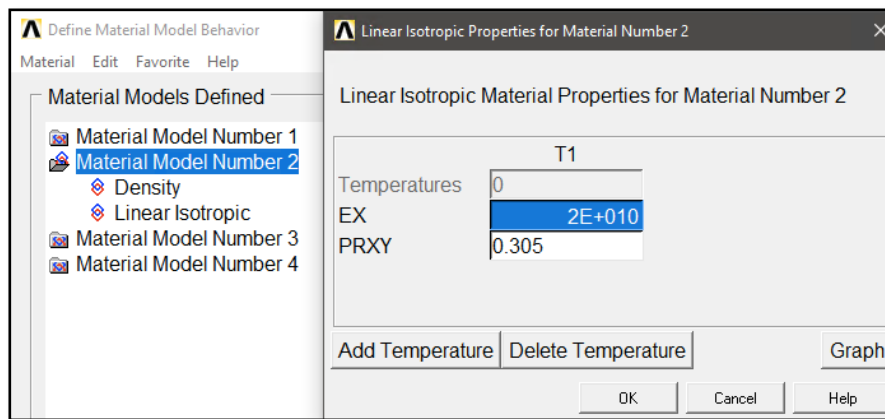


Figura 44: Definició propietats Acer Inoxidable

Material 3: Alumini 61S

Per al cas del *Material 3*, se li assignaran les propietats de l'*Alumini 61S* que s'han exposat a l'apartat de *Materials*.

- El *Material 3*, serà utilitzat per a la modelització del màstil.
- Per a modelitzar el *Material 3*, al igual que en el cas del *Material 2*, només s'hi definiran tres propietats perquè d'igual manera es tracta d'un material isotròpic.

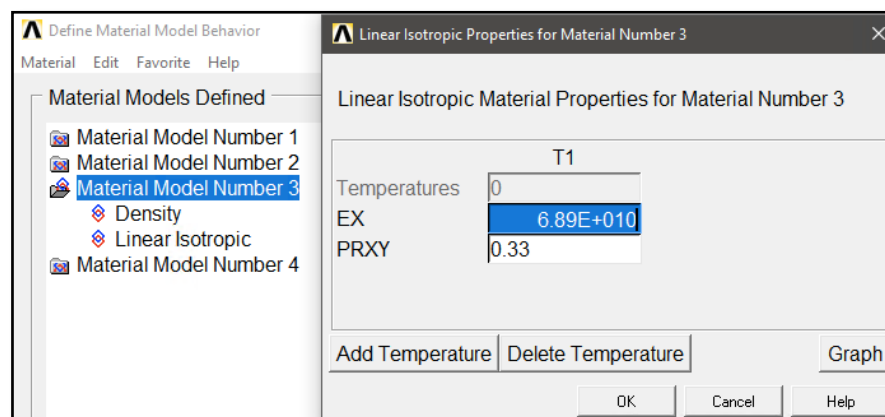
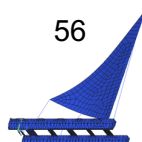


Figura 45: Definició propietats Alumini



Material 4: Polièster

Finalment, per al *Material 4* se li assignaran les propietats d'un *Polièster* concret també explicades anteriorment en l'apartat de *Materials*.

- El *Material 4*, serà utilitzat principalment per a modelitzar el teixit de la vela, però també donarà forma al cap d'escota, la estructura del qual també es basa en el polièster.
- Per a modelitzar el *Material 4*, al igual que en el cas del *Material 2 i 3*, només s'hi definiran tres propietats perquè d'igual manera es tracta d'un material isotròpic.

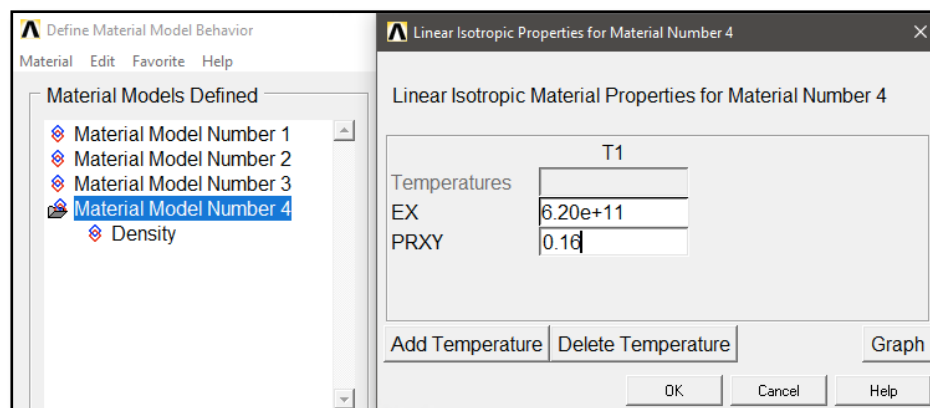
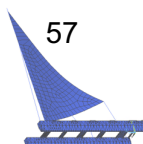


Figura 46: Definició propietats Polièster



7.7 Treball amb ANSYS APDL: Modelització

En aquest apartat, es desglossaran les diferents parts del modelatge que han estat necessàries per acabar de modelitzar tant el Patí de Vela, com la situació d'estudi a simular.

7.7.1 Modelització: Màstil i Eixàrcia

En aquesta primera fase de modelització s'exposaran els passos realitzats per arribar a construir el màstil i els seus elements de subjecció, l'eixàrcia ferma. A continuació es desglossarà el procés:

- 1) Definir els elements concrets de tipus *Beam* i *Link* que són, respectivament, *Beam188* (2 nodes) i *Link180*.
- 2) Definir les seccions dels elements Beam i Link, amb les propietats que es mostren a la *Figura 47*.

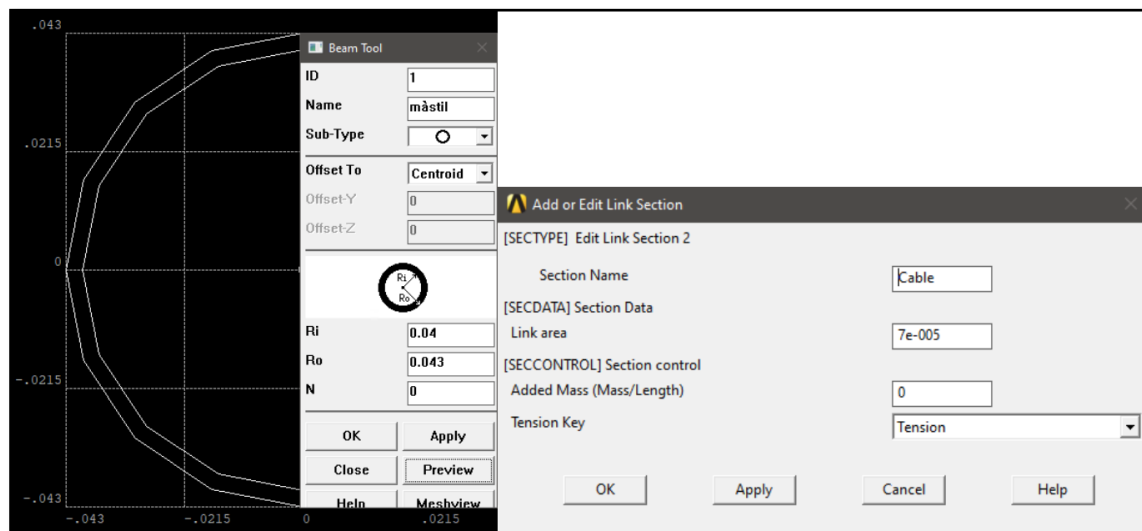
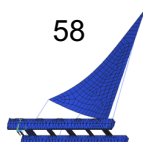


Figura 47: Característiques de les seccions dels elements Beam i Link

- 3) Crear 5 nodes en l'espai coordinat, que correspondran (*Figura 48*) a el punt més baix del màstil del màstil, el punt més alt del màstil i als punts de subjecció dels cables de l'eixàrcia.
- 4) Crear 5 línies que uneixin cronològicament els 5 nodes.
- 5) Seleccionar a la pestanya *Elem Attributes*:
 - i. Element: *Beam188*.
 - ii. Material: *Material 3*.
 - iii. Secció: *Section 1, màstil*.
- 6) Definir una mida per l'element tipus *Beam* en l'apartat de *MeshingTool*. I en el mateix apartat realitzar el mallat de les 5 línies creades.



El màstil ja ha estat creat. Tanmateix, abans de seguir amb la modelització de l'eixàrcia, comentar que donat que es tracta d'un sistema de subjecció en el que només treballen els cables situats al costat oposat d'on ve el vent, una vegada coneixent la situació futura que es simularà, només caldrà modelitzar el cablejat de l'eixàrcia que treballarà. Conseqüentment, a continuació es seguiran desglossant els passos per a la modelització d'aquesta part de l'eixàrcia:

7) Seleccionar a la pestanya *Elem Attributes*:

- i. Element: *Link180*.
- ii. Material: *Material 2*.
- iii. Secció: *Section 2, cable*.

8) Definir cada element tipus Link com la unió entre el seu node ubicat al màstil, i l'altre ubicat a la posició corresponent del Patí.

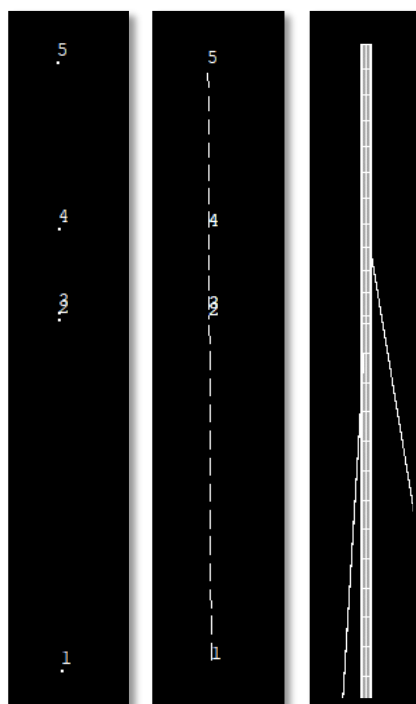


Figura 48: Fases de creació del màstil

Per últim, es definirà la unió entre el node de la base del màstil i el node del Patí que es troba centrat en el peu del màstil. D'aquesta manera i aplicant les corresponents restriccions, s'estarà modelitzant la connexió tipus ròtula esfèrica existent en qualsevol Patí de Vela actualment. Els passos per a descriure aquesta unió seran els següents:

- 9) Dirigir-se a la pestanya *Coupling* i seleccionar els dos nodes comentats.
- 10) Donar un número de referencia a la unió, i restringir l'eix x de desplaçaments.
- 11) Finalment, caldrà realitzar els passos 9) i 10) amb els eixos y i z.

Indirectament la comanada *Coupling* està obligant al segon node seleccionat a realitzar el moviments (en la direcció seleccionada) que faci el primer node. D'aquesta manera quedaran lligats sense restringir-ne les rotacions. Podrà observar-se la modelització d'aquesta unió, mostrant-se com 3 petits triangles verds en la *Figura 49*.

Ara sí, una vegada acabada la primera fase de modelització, es podrà visualitzar el resultat d'aquesta en la *Figura 49*.

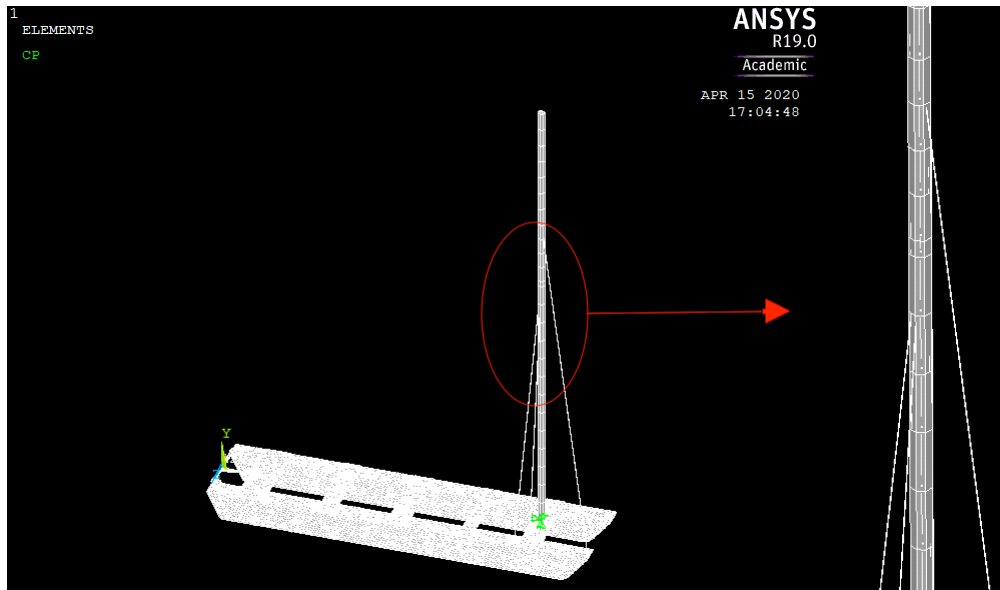
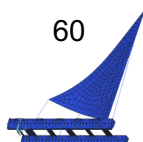


Figura 49: Resultat final de la creació de l'eixàrcia ferma i el màstil



7.7.2 Modelització: Vela i elements d'unió

Una vegada construït el màstil i l'eixàrcia, s'entendrà perquè es va dividir en petits elements en comptes de construir-ne un de sol. La raó, recau en el procés de modelització de la vela, doncs aquesta tenia que fixar-se al màstil d'una manera que simulés la realitat de la millor manera possible.

Per entendre-ho adequadament, els màstils reals disposen d'una petita guia per la qual es subjecta la vela. Donat el desconeixement d'una eina d'ANSYS capaç de realitzar una unió com aquesta, es va decidir unir node a node el màstil i la vela. Posteriorment, es restringirien tan sols els desplaçaments en els eixos x i z, deixant lliure l'eix vertical. Lògicament, imitant els patins reals, els primers i últims nodes d'unió si que serien restringits en l'eix vertical, per tal d'evitar que la vela s'escorregués per la part inferior o superior del màstil.

Tenint en compte les anteriors consideracions, tot seguit es procedirà al desglossament dels passos per a modelitzar la vela del Patí:

- 1) Definir l'element concret de tipus *Shell* anomenat *Shell281* (8nodes).
- 2) Definir la secció de l'element tipus *Shell*, amb les propietats que es mostren a la *Figura 50*.

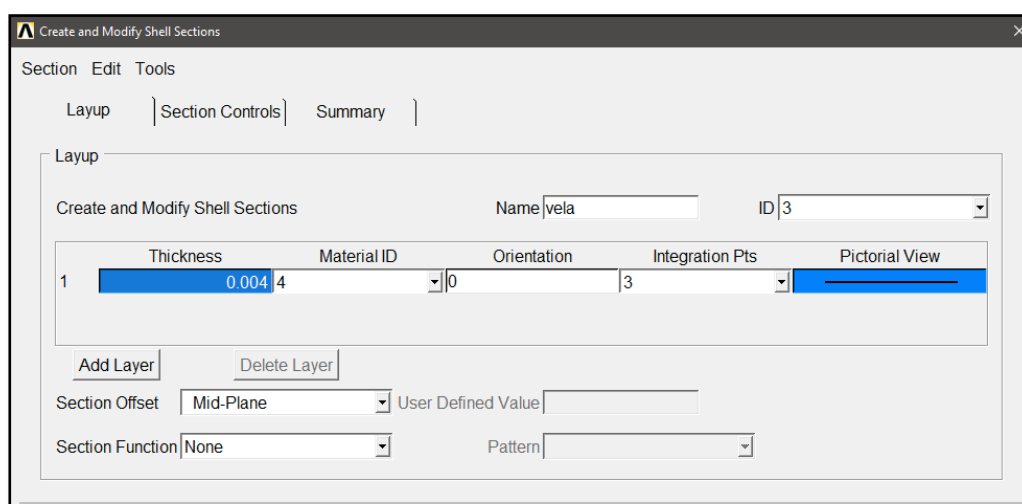


Figura 50: Característiques de la secció de l'element Shell281

- 3) Crear 3 *Keypoints* en l'espai coordinat, que correspondran als 3 extrems de la vela de tipus *Bermudiana*, tal i com es mostra en la *Figura 51* (obviant els nodes del màstil, els quals es troben extremadament a prop).
- 4) Crear 3 línies que uneixin els 3 punts (*Figura 51*).

- 5) Seleccionar a la pestanya *Elem Attributes*:
 - i. Element: *Shell281*.
 - ii. Material: *Material 4*.
 - iii. Secció: *Section 3, vela*.
- 6) Definir la mida dels elements que tindrà la vela (en l'apartat de *MeshingTool*) de manera que apareguin nodes adjacents als creats anteriorment al màstil. D'aquesta manera es podrà realitzar la unió.
- 7) Mallar la superfície compresa entre les 3 línies.
- 8) Dirigir-se a la pestanya *Coupling* i seleccionar un node del màstil i el seu complementari a la vela.
- 9) Restringir l'eix x i z de desplaçaments (en el cas de les primeres i últimes unions, es restringirà també l'eix y vertical).
- 10) Finalment, caldrà repetir els passos 8) i 9) per a tots els nodes al llarg de l'eix del màstil fins arribar al últim, tal i com es mostra a la *Figura 52*.

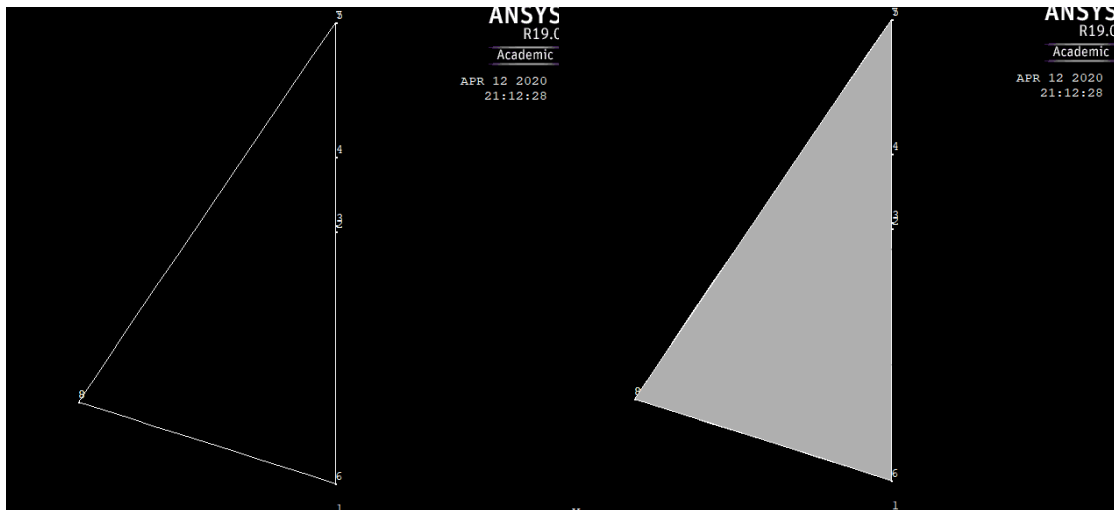


Figura 51: Fases de creació de la vela

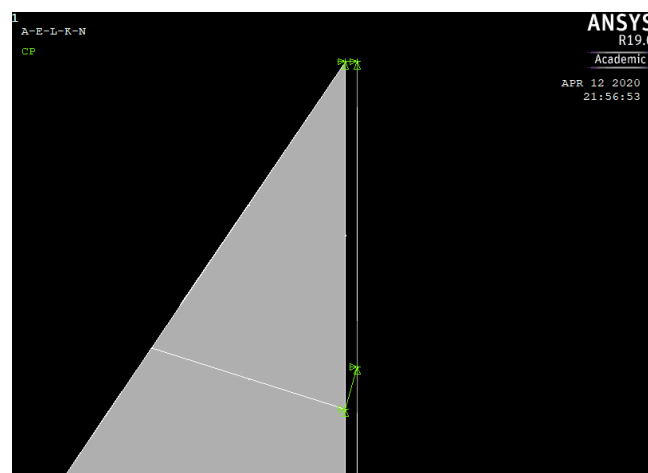
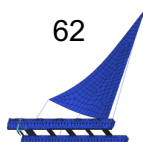


Figura 52: Unions tipus Coupling entre nodes del màstil i nodes de la vela



- 11) Crear un node just al punt de la barra d'escota on es fixarà aquesta, és a dir, a la banda cap a on es posicionarà la vela al rebre la pressió del vent.
- 12) Seleccionar a la pestanya *Elem Attributes*:
 - i. Element: *Link180*.
 - ii. Material: *Material 4*.
 - iii. Secció: *Section 2, cable*.
- 13) Definir un element d'unió tipus Link, entre el node de la vela més allunyat del màstil i el node proper a la barra d'escota anteriorment creat. Amb aquesta acció s'estarà creant el cap d'escota.
- 14) Per últim, caldrà connectar el node creat amb el node més proper corresponent a la barra d'escota utilitzant una funció *Coupling* (restringint els moviment en els 3 eixos però no les rotacions).

Una vegada acabada la modelització de tots els element anteriorment exposats, se'n podrà observar el resultat en la *Figura 53*.

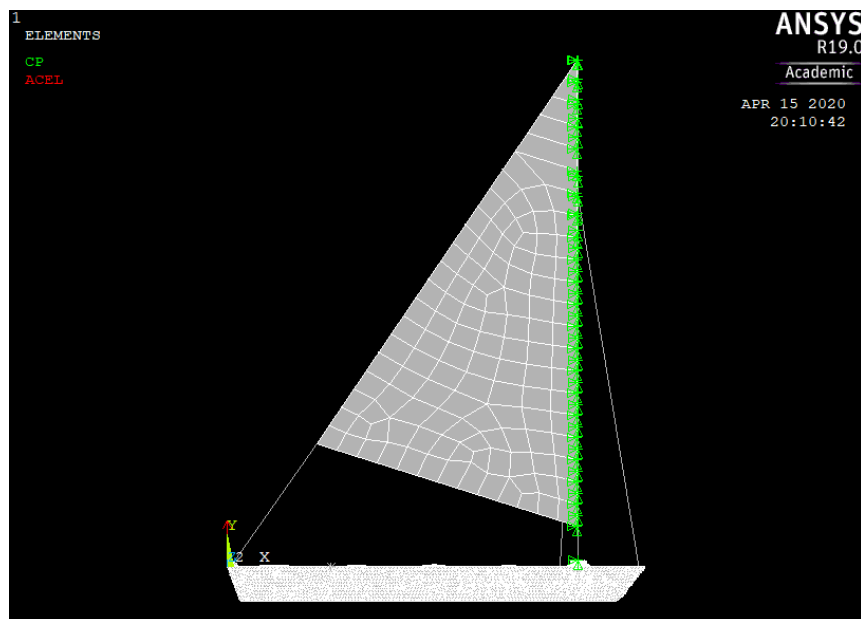
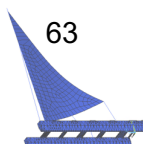


Figura 53: Resultat final de la creació de la vela i dels seus elements de subjecció



7.7.3 Modelització: Situació de navegació

En aquest darrer apartat de la fase de modelització del Patí de Vela, s'exposaran els diferents detalls i factors que han estat necessaris per arribar a modelitzar la situació de navegació concreta objecte d'estudi.

Gravetat

En aquest subapartat no només s'explicaran els passos per arribar a modelitzar l'acceleració de la gravetat, sinó que s'aprofitarà per explicar la manera en la que s'ha provocat la inclinació del Patí de Vela per a la simulació.

La problemàtica es remunta al moment en que es va crear el model tridimensional amb SolidWorks, allà indirectament ja s'estaven definint els eixos que a partir d'aquell moment serien els globals del sistema.

Donat que arribat al punt actual ja no es podia recular, al disposar-se a avaluar la situació, es va veure que el que realment afectava la inclinació del Patí era:

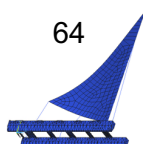
- La direcció del vector *Pes* dels cossos.
- La incidència del vent en la vela.
- El fregament amb l'aigua.

Tanmateix, menyspreant el problema del fregament de l'aigua (ja es va esmentar a l'inici del projecte que no es tindria en compte), es va veure que ambdós factors tan sols depenien de les direccions vectorials. Conseqüentment, es va optar per deixar el Patí en una posició horitzontal davant dels eixos globals i modificar les components vectorials del pes (gravetat) i el vent.

Per a tot això, a continuació s'exposarà la metodologia que s'ha utilitzat per a definir la gravetat descomposta en els eixos x i y, suposant un angle genèric:

- Dirigir-se al apartat de *Loads* i prosseguir fins a la pestanya *Apply*, després *Structural*, després *Inertia*, i finalment *Gravity*. Seguidament especificar cada component [7].
- Altrament, escriure a la *Command Window* la següent seqüència de caràcters:

>> *ACEL, -sin(angle)·9.81, +cos(angle)·9.81, 0*



Mass point

En aquest subapartat s'exposaran els passos a seguir per a modelitzar el pes del tripulant en les diferents situacions que es modelitzaran. Tal i com ja s'ha comentat amb anterioritat, es concentrarà tota la massa d'un tripulant genèric (80 Kg) en un punt i es col·locarà en una de les posicions que s'han especificat als apartats de teoria. A continuació es desglossaran les fases a seguir per a modelitzar-la amb ANSYS:

- 1) Crear un element tipus Mass21.
- 2) Assignar-li un pes de 80 Kg en l'apartat de Real Constants.
- 3) Seleccionar a la pestanya *Elem Attributes*:
 - i. Element: *Mass21*.
 - ii. Real Constant: 1.
 - iii. Secció: *Undefined* (al definir una *Real Constant* no cal definir secció).
- 4) Crear l'element massic assignant-lo al node que estigui més pròxim a la posició que correspongui.

Donat que per aquest apartat i l'anterior la visualització a l'ANSYS APDL no representa quasi cap canvi, a continuació en la *Figura 54* es representarà amb ANSYS Workbench la partícula massica i la equivalència d'afegir un factor com la gravetat d'una manera descomposta, simulant així la inclinació del Patí.

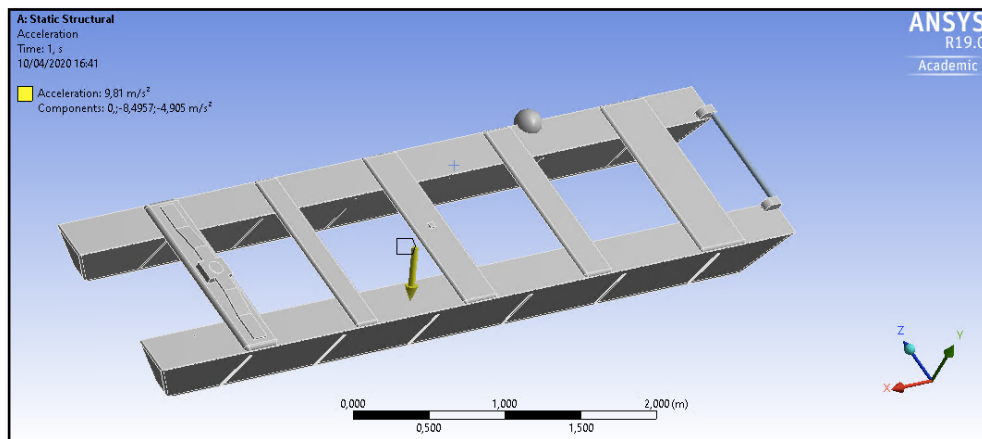
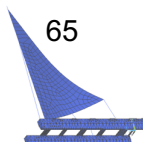


Figura 54: Modelització de la gravetat i la partícula massica



Element de subjecció

En aquest subapartat s'exposarà breument la incorporació d'un element essencial per a simular la situació d'escora de l'embarcació. L'anàlisi amb el que es treballarà a l'ANSYS serà de tipus estàtic i per tant no serà possible deixar un dels patins flotant al aire. Tanmateix, serà necessària la incorporació d'un element que subjecti aquest patí flotant però que no suposi ningun esforç extra.

La idea es basa en definir un sistema iteratiu, on després de fixar el patí flotant es vagi variant la velocitat del vent fins que s'aconsegueixi que el treball d'aquest element de fixació sigui quasi nul.

A continuació s'exposaran els passos per a definir aquest element:

- 1) Crear una nova secció per a un element tipus Link i assignar-li un àrea de valor petit.
- 2) Crear un nou node a una posició pròxima dels elements inferiors del flotador que es mantindrà a l'aire.
- 3) Seleccionar a la pestanya *Elem Attributes*:
 - i. Element: *Link180*.
 - ii. Material: Material 4.
 - iii. Secció: 4, element_subjector.
- 4) Crear l'element unint el node creat amb un de la base del patí flotant.

Per últim, comentar que l'element s'ha posicionat paral·lel al eix Y de manera que es pugui observar fàcilment el seu allargament o escurçament amb el gràfic del camp de desplaçaments.



Condicions de contorn

Per que fa a la modelització de les condicions de contorn tals com restriccions de desplaçament totals i parcials, en aquest projecte només se'n aplicar dues. D'una banda es procurarà que tota la línia més externa de la base del flotador que simularia estar en contacte amb l'aigua, es mantingui totalment restringida de cap moviment. D'altra banda es procurarà fixar també de forma global el node inferior de l'element subjector. Els passos per a modelitzar aquestes condicions seran els següents:

- 1) Dirigir-se al apartat *Loads* del *Preprocessor* i accedir a la comanda *Apply\Structural\Displacement*, els nodes que es vulguin restringir.
- 2) Especificar a la finestra emergent que es vol restringir el moviment vertical i a només un dels nodes, restringir-ne totes les direccions (sempre deixant les rotacions lliures).
- 3) Repetir l'acció 1) i 2) però aquesta vegada seleccionant el node inferior de l'element de subjecció.

El resultat d'aplicar aquestes condicions de contorn es pot observar en la següent *Figura 55*.

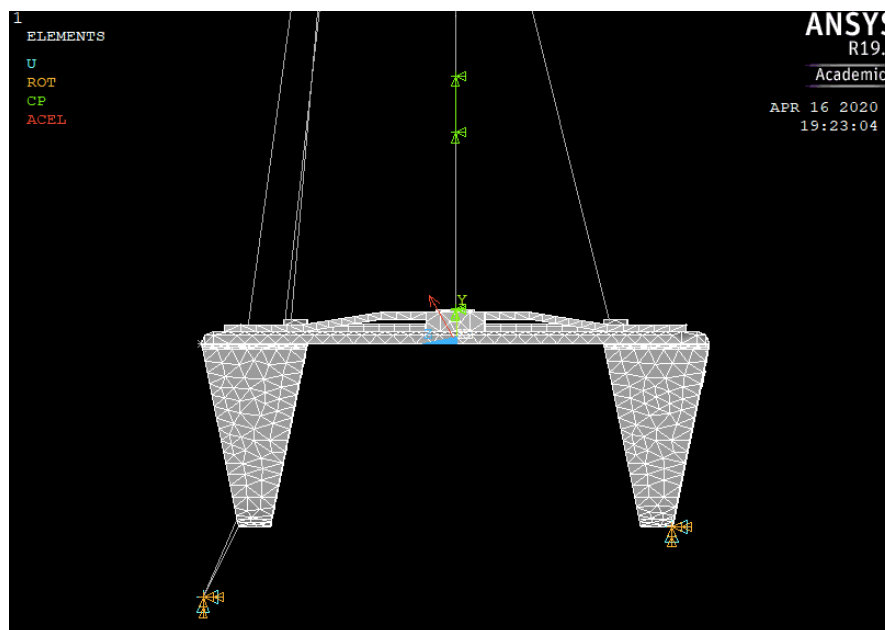
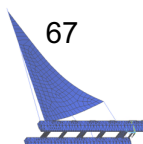


Figura 55: Adició de les condicions de contorns del model



Càrregues

La modelització de les càrregues externes, més concretament de la pressió del vent, es definirà en funció de la inclinació del Patí de les següents dues maneres:

S'aplicarà una pressió global sobre el total de la superfície vèlica per al cas d'inclinacions baixes, i una pressió parcial sobre la superfície on realment incideix el vent per a inclinacions majors. Aquestes pressions seran perpendicular al pla vèlic i per tant el valor a especificar serà el de la component normal de la pressió total del vent (calculat a l'apartat 6.2.2).

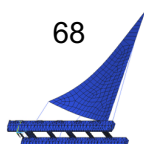
Els passos per a modelitzar aquesta càrrega externa seran els següents:

- 1) Dirigir-se al apartat *Loads* del *Preprocessor* i accedir a la comanda *Apply\Structural\Pressure*.
- 2) Seleccionar tota la superfície vèlica o la porció d'elements on realment incideix el vent (en el cas d'altres inclinacions).
- 3) Especificar a la finestra emergent la component normal de la pressió corresponent a l'angle i velocitat que corresponguin.

Per a finalitzar la fase de modelització, s'exposarà a continuació un quadre resum de tots els tipus d'elements, materials i característiques de secció (o constants reals) corresponents a cada entitat modelitzada (*Taula 8*).

Entitats	Tipus d'element	Constants Reals	Secció	Material
Flotadors i bancades	Solid186	-	-	Fusta (1)
Barra d'escota	Solid186	-	-	Acer Inoxidable (2)
Màstil	Beam188	-	$R_i = 0.04$, $R_o = 0.043$	Alumini (3)
Eixàrcia	Link180	-	Àrea = $7e-5$	Acer Inoxidable (2)
Vela	Shell281	-	Gruix = $4e-3$	Polièster (4)
Escota	Link180	-	Àrea = $3.14e-4$	Polièster (4)
Tripulant	Mass21	80Kg	-	Alumini (3)
Element de Subjecció	Link180	-	Àrea = $7e-5$	Polièster (4)

Tabla 8: Taula resum de les propietats de cada component del Model



7.8 Simulacions prèvies

En aquest apartat es simularan una sèrie de situacions amb les quals es buscarà arribar a posicionar el model en la situació teòrica descrita en un principi. Per aconseguir-ho, es realitzaran dos fases clau de simulació:

- En primer lloc, es simularà una situació on només s'estudiarà el **Pes Propi** de l'embarcació. Amb això, es buscarà afinar alguns paràmetres del model per arribar a fer-lo més realista.
- A continuació, es realitzaran una seqüència de simulacions independents **considerant diferents inclinacions del Patí**.

L'objectiu de cadascuna de les simulacions amb diferent inclinació serà buscar la posició d'equilibri del Patí tot jugant amb les càrregues del vent i observant a posteriori les tensions de l'element subjector.

D'aquesta manera, es podrà determinar la situació més crítica d'entre totes les inclinacions i pressions del vent possibles.

Pel que fa al model, en tot moment es treballarà amb el *Model Simplificat* de Patí de Vela degut a una sèrie d'errors que no ha estat possible eradicar. Principalment, degut a que la llicència de treball només permetia un màxim específic d'elements en el model, i per tant, no era possible treballar amb el Model Final; d'una banda amb el mallat realitzat inicialment col·lapsava el programa al simular, i d'altre, era impossible de realitzar mallats més grans ja que no s'adaptaven a la geometria.

Tanmateix, no són gaires les diferències a nivell estructural i de resistència que existeixen entre ambdós models i per tant es consideraran com a vàlides les conclusions que se'n extreguin.

7.8.1 Simulació del Pes Propi

Abans de poder realitzar les simulacions referents al Cas Base d'estudi, s'haurà realitzar una primera experiència de simulació amb la qual s'anivellin diferents paràmetres del model.

L'exemple que es presentarà a continuació es el del Pes Propi de l'embarcació. Aquest, jugarà un paper molt important en el sistema d'estudi i per tant haurà d'ésser coherent.

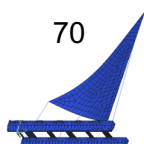
La raó per la qual s'hagin d'anivellar les masses del Patí és principalment que els dissenys tridimensionals realitzats no s'ajusten exactament al volum real del Patí i, al especificar-hi les mateixes densitats que els materials reals, generalment les masses dels cossos augmentaran.

En el cas del *Model Simplificat*, al realitzar-ne la primera simulació el programari marcava unes masses dels elements tipus *Solid* (bancades, flotadors i barra d'escota) de quasi 400 Kg. Tanmateix, donat que el pes d'un Patí generalment estaria sobre els 100 Kg, es va disminuir la densitat de la fusta utilitzada fins a obtenir-ne unes masses de l'ordre indicat.

A continuació, en la *Figura 56*, es podran observar les masses amb les que es treballarà en endavant. On, l'element 1 (*Solid*) representarà les bancades, flotadors i barra d'escota; l'element 2 (*Beam*) el màstil; l'element 3 (*Link*) el conjunt d'eixàrcies, escota i element de subjecció; l'element 4 (*Shell*) la vela; i per últim, l'element 5 el pes del tripulant.

*** MASS SUMMARY BY ELEMENT TYPE ***	
TYPE	MASS
1	103.230
2	9.10460
3	0.808569
4	8.39760
5	80.0000

Figura 56: Resum de les masses del sistema observat per l'Output Window



7.8.2 Simulacions variant la inclinació del Patí

En aquest apartat, tal i com ja s'ha comentat anteriorment, es realitzaran una seqüència de simulacions independents considerant diferents inclinacions del Patí. L'objectiu final d'aquest apartat serà trobar la situació de navegació més crítica possible en quan a tensions, i per tant, s'espera trobar un angle i pressió del vent específics per a l'estudi.

Per tal de modelitzar cada inclinació independentment, s'hauran de variar dos paràmetres: les components de la gravetat i la posició de compensació del tripulant.

La seqüència d'inclinacions es basarà en el moviment del tripulant al llarg de les 4 posicions exposades en els apartats teòrics. Així doncs, es simularà una inclinació per a cada posició del tripulant, més concretament: 10^0 , 15^0 , 25^0 i 35^0 . Després, es seguiran realitzant simulacions fins a arribar a la inclinació crítica, és a dir, inclinació màxima on l'embarcació bolcaria (mantenint al tripulant en la posició més descentrada).

Per últim, donat que es requerirà d'una gran ajuda visual i gràfica per a prendre les millors conclusions, s'annexaran tots els continguts referents als següents subapartats en el quart punt dels Annexos.

Inclinació: 10 graus

En aquest primer subapartat, tal i com ja s'ha comentat anteriorment, es realitzaran una sèrie de simulacions l'objectiu de les quals serà aconseguir reduir els esforços existents en l'element que subjecta el Patí per així simular una situació de quasi equilibri estàtic.

Una manera de fer-ho, serà començar simulant amb velocitats baixes de vent (5 nusos) les quals mostraran de ben segur com el Patí no tendeix a la escora i per tant l'element de subjecció treballarà a compressió. Tot seguit, s'aniran augmentant aquestes velocitats fins a observar un canvi en la direcció de treball d'aquest element (compressió → Tracció). Després, s'haurà de retrocedir i reduint els intervals d'acció s'intentarà precisar en la mesura del possible la velocitat del vent en que es produeix l'equilibri.

Primer de tot, per modelitzar els 10 graus, es modificaran permanentment les components de la gravetat tal i com s'ha exposat en l'apartat de modelització:

Component	ACEL fórmula	ACEL valor
x	$-\sin(10) \cdot 9.81$	-1,7
y	$+\cos(10) \cdot 9.81$	9,66
z	0	0

Taula 9: Components de la gravetat en els eixos globals

D'altra banda, al tractar-se d'una inclinació baixa s'adoptarà la posició del tripulant tipus **centrada**, anteriorment explicada en els corresponents apartats teòrics.

Per a totes i cadascuna de les inclinacions que s'estudiaran, s'analitzaran els següents gràfics o resultats:

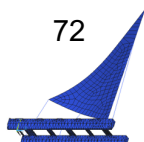
- 1) El camp de desplaçaments verticals (eix Y) de l'element subjector, especialment el desplaçament màxim (SMX) corresponent sempre al node d'unió amb el Patí.
- 2) Les tensions principals 1 i 3 de l'element (S1 i S3 respectivament).

Els resultats es podran observar en forma de dades a la *Taula 10*, o en forma de *Figures* als *Annexos* corresponents. En color verd s'escriuran les iteracions en augment, i en vermell quan s'hagi passat de llarg l'objectiu i s'hagi de retrocedir. Subrallada en blau estarà la última iteració que marcarà la fi de del procés.

V [nudos]	NPressió	SMX	S1	S3
5	3,99	-0,0276 "Compressió"	0	-0,387e+10
10	15,96	-0,0208 "Compressió"	0	-0,291e+10
20	63,84	+0,0064 "Tracció"	+0,891e+09	0
18	51,71	-0.0005 "Compressió"	0	-0,735e+08
19	57,62	+0,0028 "Tracció"	+0,396e+09	0

Taula 10: Resultats de la simulació amb 10 graus d'inclinació, unitats SI

Finalment es pot concloure que amb una inclinació de 10 graus la velocitat de vent que permet el quasi equilibri de la embarcació és de 18 nusos. Amb aquesta càrrega, les tensions principals 1 i 3 a la base del Patí oscil·len sobre els de +0,2 MPa i +0,2 MPa.



Inclinació: 15 graus

En aquest segon apartat, es repetiran exactament els mateixos passos que en l'anterior però modelitzant ara una inclinació de 15 graus.

Modificació permanent les components de la gravetat:

Component	ACEL fórmula	ACEL valor
x	$-\sin(15) \cdot 9.81$	-2.54
y	$+\cos(15) \cdot 9.81$	9,48
z	0	0

Taula 11: Components de la gravetat en els eixos globals

D'altra banda, al tractar-se d'una inclinació mitjana s'adoptarà la posició del tripulant tipus **mitjanament centrada**, anteriorment explicada en els corresponents apartats teòrics.

Els resultats es podran observar en forma de dades a la *Taula 11*, o en forma de *Figures* als *Annexos* corresponents.

V [nudos]	NPressió	SMX	S1	S3
10	15,65	-0,0206	0	-0,288e+10
20	62,6	+0,0057	+0,802e+09	0
18	50,72	-0,0007	0	-0,942e+08
19	56,51	+0,0023	+0,366e+09	0

Taula 12: Resultats de la simulació amb 15 graus d'inclinació, unitats SI

Finalment es pot concloure que amb una inclinació de 15 graus la velocitat de vent que permet el quasi equilibri de la embarcació és de 18 nusos. Amb aquesta càrrega, les tensions principals 1 i 3 a la base del Patí oscil·len sobre els de -0,3MPa i -0,4 MPa respectivament.

Es pot observar com la velocitat d'equilibri ha augmentat lleugerament (probablement unes dècimes) respecte de l'anterior cas, fixant-nos en l'amplada dels rangs dels dos últims intervals d'iteració. A la pràctica, aquest resultat tan sols mostra com el moviment del tripulant ha contrarrestat la pèrdua de moment d'inèrcia al inclinar-se el Patí 5 graus més.

Inclinació: 25 graus

En aquest apartat, es repetiran exactament els mateixos passos que en els anteriors però modelitzant ara una inclinació de 25 graus.

Modificació permanent les components de la gravetat:

Component	ACEL fórmula	ACEL valor
x	$-\sin(25) \cdot 9.81$	-4,15
y	$+\cos(25) \cdot 9.81$	8,89
z	0	0

Taula 13: Components de la gravetat en els eixos globals

D'altra banda, al tractar-se d'una inclinació mitjana s'adoptarà la posició del tripulant tipus **mitjanament descentrada**, anteriorment explicada en els corresponents apartats teòrics.

Els resultats es podran observar en forma de dades a la *Taula 13*, o en forma de *Figures* als *Annexos* corresponents.

V [nudos]	NPressió	SMX	S1	S3
10	14,69	-0,0215	0	-0,301e+10
20	58,75	+0,0079	+0,488e+09	0
18	47,59	-0,0029	0	-0,399e+09
19	53,03	+0,0002	+0,334e+08	0

Taula 14: Resultats de la simulació amb 25 graus d'inclinació, unitats SI

Finalment es pot concloure que amb una inclinació de 25 graus la velocitat de vent que permet el quasi equilibri de la embarcació és de 19 nusos. Amb aquesta càrrega, les tensions principals 1 i 3 a la base del Patí oscil·len sobre els de -0,6MPa i +0,5 MPa respectivament.

En aquest apartat ja es pot apreciar més clarament l'augment d'aquesta velocitat d'equilibri respecte dels anteriors casos. Efectivament, al augmentar aquest nus de vent respecte del cas anterior l'embarcació s'ha inclinat 10 graus més i el tripulant per establitzar-se s'ha desplaçat a una posició més descentrada.



Inclinació: 35 graus

En aquest apartat, es repetiran exactament els mateixos passos que en els anteriors però modelitzant ara una inclinació de 35 graus.

Modificació permanent les components de la gravetat:

Component	ACEL fórmula	ACEL valor
x	$-\sin(35) \cdot 9.81$	-5,63
y	$+\cos(35) \cdot 9.81$	8,04
z	0	0

Taula 15: Components de la gravetat en els eixos globals

D'altra banda, al tractar-se d'una inclinació alta s'adoptarà la posició del tripulant tipus **descentrada**, anteriorment explicada en els corresponents apartats teòrics.

Els resultats es podran observar en forma de dades a la *Taula 15*, o en forma de *Figures* als *Annexos* corresponents.

V [nudos]	NPressió	SMX	S1	S3
10	13,28	-0,0210	0	-0,295e+10
20	53,10	+0,0016	+0,219e+09	0
19	47,93	-0,0014	0	-0,192e+09

Taula 16: Resultats de la simulació amb 35 graus d'inclinació, unitats SI

Finalment es pot concloure que amb una inclinació de 35 graus la velocitat de vent que permet el quasi equilibri de la embarcació és de 19 nusos. Amb aquesta càrrega, les tensions principals 1 i 3 a la base del Patí oscil·len sobre els de +0,3MPa i +0,03 MPa respectivament.

En aquest apartat torna a passar com en els primers casos, l'increment de velocitat d'equilibri respecte del cas amb 25⁰ d'inclinació no es suficientment gran com per arribar als 20 nusos.

Inclinació: 40 graus

S'ha realitzat una última simulació per assegurar que la inclinació crítica no es trobava en angles superiors a 35 graus. Aquest supòsit del 35 graus s'ha pres tenint en comte dos factors:

- 1) A partir dels 25 graus d'inclinació en amunt, les components normals de les pressions d'equilibri només faran que disminuir a raó del cosinus de l'angle.
- 2) A partir dels 35 no s'han definit posicions més descentralitzades per al tripulant (ja que es tracta de la màxima) i per tant, si es manté la mateixa posició màxima però es segueix augmentant la inclinació, les velocitats d'equilibri només disminuiran.

A continuació, es repetiran exactament els mateixos passos que en els apartats anteriors però modelitzant una inclinació de 40 graus. En el cas de les components de la gravetat, quedaran bastant simètriques per a X i Y (*Taula 17*).

Component	ACEL fórmula	ACEL valor
x	$-\sin(40) \cdot 9.81$	-6,3
y	$+\cos(40) \cdot 9.81$	7,51
z	0	0

Taula 17: Components de la gravetat en els eixos globals

Tal i com s'ha comentat, s'adoptarà altre cop la posició del tripulant tipus **descentrada**.

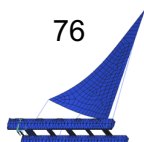
Els resultats es podran observar en forma de dades a la *Taula 18*, o en forma de *Figures* als *Annexos* corresponents.

V [nudos]	NPressió	SMX	S1	S3
10	12,42	-0,0169	0	-0,237e+10
20	49,66	+0,0042	+0,590e+09	0
18	40,23	-0,0011	0	-0,16e+09
19	44,82	+0,0015	+0,205e+09	0

Taula 18: Resultats de la simulació amb 40 graus d'inclinació, unitats SI

Finalment es pot concloure que amb una inclinació de 40 graus la velocitat de vent que permet el quasi equilibri de la embarcació és de 18 nusos. Amb aquesta càrrega, les tensions principals 1 i 3 a la base del Patí oscil·len sobre els de +0,1MPa i -0,1 MPa respectivament.

Es pot observar com lògicament la velocitat d'equilibri ha disminuït respecte de l'anterior apartat, ja que, el tripulant s'ha mantingut en la mateixa posició descentrada però amb més inclinació i per tant menys moment d'inèrcia a contrarrestar. És pot concloure que no es trobaran tensions majors en angles d'inclinació superiors a 35 graus.



Cerca de la Inclinió crítica de bolcada

En aquest apartat, es realitzaran una sèrie de simulacions l'objectiu de les quals serà determinar la inclinació màxima de navegació. En altres termes, es buscarà aquell angle de navegació on, suposant una posició del tripulant descentrada, l'embarcació bolqui per a una pressió del vent nul·la.

Es realitzarà el mateix procediment utilitzat anteriorment per a trobar la velocitat de vent crítica. És a dir, s'anirà augmentant la inclinació del Patí fins a observar la bolcada i després es retrocedirà.

Cal recordar que en aquests apartats d'altres inclinacions s'aplicarà la pressió de vent només sobre les superfícies vèliques on realment hi incideix, modelitzant la situació de la manera més realista possible.

i. Inclinió de 50 graus:

Primer es modificarà la gravetat i la posició del tripulant per a una inclinació de 50 graus. Després, es realitzaran dues simulacions: una sense càrrega i una amb 5 nusos de vent per a prevenir la bolcada imminent. Finalment, per a l'anàlisi, s'observaran altre cop les reaccions de l'element que subjecta el Patí.

Els resultats de la simulació amb una inclinació de 50 graus es podran observar en forma de dades a la *Taula 20* o en forma de *Figures* als *Annexos* corresponents.

Component	ACEL valor
x	-7,51
y	6,31
z	0

Taula 19: Components de la gravetat en els eixos globals

V [nusos]	NPressió	SMX
0	0	-0,0092 "Compressió"
5	2,60	-0,0078 "Compressió"

Taula 20: Resultats de la simulació amb 50 graus d'inclinació, unitats SI

Es pot observar com no solament els 5 nusos de vent no provoquen que l'embarcació bolqui, sino que es produeix una compressió de l'element subjector de quasi 8 mm.

ii. Inclinatoria de 60 graus:

A continuació, es repetiran exactament els mateixos passos que en l'apartat anterior però modelitzant una inclinació de 60 graus.

Els resultats de la simulació amb una inclinació de 60 graus es podran observar en forma de dades a la *Taula 22* o en forma de *Figures* als *Annexos* corresponents.

Component	ACEL valor
x	-8,5
y	4,91

Taula 21: Components de la gravetat en els eixos globals

V [nudos]	NPressió	SMX
0	0	-0,0012
5	2,03	-0,0002

Taula 22: Resultats de la simulació amb 60 graus d'inclinació, unitats SI

Es pot observar com el Patí segueix recolzant sobre l'element de subjecció i per tant encara no cedeix davant la inclinació. Tanmateix, es pot observar com la bolcada és imminent i per tant es molt probable que s'assoleixi en la següent iteració.

iii. Inclinatoria de 70 graus:

A continuació, es repetiran exactament els mateixos passos que en els apartats anteriors però modelitzant una inclinació de 70 graus.

Els resultats de la simulació amb una inclinació de 70 graus es podran observar en forma de dades a la *Taula 24* o en forma de *Figures* als *Annexos* corresponents.

Component	ACEL valor
x	-9,22
y	3,36

Taula 23: Components de la gravetat en els eixos globals

V [nudos]	NPressió	SMX
0	0	+0,0067 "Tracció"

Taula 24: Resultats de la simulació amb 70 graus d'inclinació, unitats SI



En aquest cas, no ha calgut ni aplicar els 5 nusos de vent per a que bolqui l'embarcació. En altres termes, el Patí bolcarà sigui quina sigui la força del vent si en algun moment arriba als 70^0 d'escora.

iv. Inclinació de 65 graus

A continuació, es repetiran exactament els mateixos passos que en els apartats anteriors però modelitzant una inclinació de 65 graus, d'aquesta manera s'escorçarà el rang de possibilitats on l'embarcació pugui bolcar.

Els resultats de la simulació amb una inclinació de 65 graus es podran observar en forma de dades a la *Taula 26* o en forma de *Figures* als *Annexos* corresponents.

Component	ACEL valor
x	-8,89
y	4,15

Taula 25: Components de la gravetat en els eixos globals

V [nusos]	NPressió	SMX
0	0	+0,042 "Tracció"

Taula 26: Resultats de la simulació amb 65 graus d'inclinació, unitats SI

Es pot observar com amb una inclinació de 65 graus es repeteix l'escena anterior.

v. Inclinació de 61 graus

A continuació, es repetiran exactament els mateixos passos que en els apartats anteriors però modelitzant una inclinació de 61 graus.

Els resultats de la simulació amb una inclinació de 61 graus es podran observar en forma de dades a la *Taula 28* o en forma de *Figures* als *Annexos* corresponents.

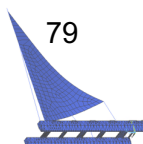
Component	ACEL valor
x	-8,89
y	4,15

Taula 27: Components de la gravetat en els eixos globals

V [nusos]	NPressió	SMX
0	0	+0,0009 "Tracció"

Taula 28: Resultats de la simulació amb 61 graus d'inclinació, unitats SI

Finalment, es pot afirmar que en el pas de 60 a 61 graus d'inclinació es provocarà la bolcada de l'embarcació sigui quina sigui la pressió del vent.



7.9 Simulació final i resultats

Tal i com s'ha explicat anteriorment, en aquest apartat s'estudiarà la situació modelitzada al llarg del treball utilitzant la inclinació del Patí en equilibri més crítica trobada. Revisant el recull de simulacions realitzades, es pot observar com amb la inclinació de **25 graus** i la pressió de 53,03 N/m² (**19 nusos de vent**) s'assoleixen les majors tensions en el global del Patí de Vela.

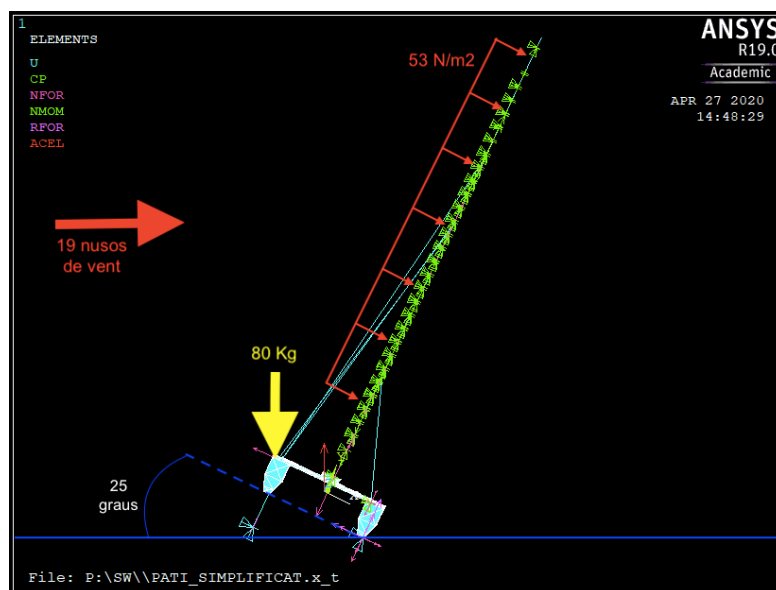
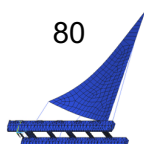


Figura 57: Croquis de la situació crítica a analitzar.

Tanmateix, l'objectiu principal de l'estudi serà estudiar els esforços que pateix cadascuna de les parts principals que conformen l'embarcació i siguin objecte d'estudi. D'aquesta manera es comprovarà la resistència de cadascuna d'aquestes parts per separat. A més a més, s'haurà de tenir en compte que les simulacions que es realitzaran amb ANSYS seran de caire lineal i per tant només plasmaran les deformacions en rang elàstic. Això provoca la impossibilitat d'apreciar si un material falla o es deforma plàsticament i per tant s'haurà d'anar comprovant constantment.

L'estudi es desglossarà començant per un anàlisi global del Patí i seguint amb cadascuna de les parts principals que el conformen i siguin objecte d'estudi. En cada anàlisi constaran els següents gràfics:

- 1) Gràfic de deformacions (*Deformed Shape*).
- 2) Mapa de desplaçaments verticals (*Nodal Solution Plot, UX*).
- 3) Mapa de desplaçaments horitzontals (*Nodal Solution Plot, UY*).
- 4) Mapa de les tensions principals 1 en els nodes (*Nodal Solution Plot, S1*).
- 5) Mapa de les tensions principals 3 en els nodes (*Nodal Solution Plot, S3*).
- 6) Mapa de les tensions de Von Misses en els nodes (*Nodal Solution Plot, Von Misses Stress*).



7.9.1 Anàlisi global

En aquest apartat s'analitzarà la totalitat de l'embarcació en la situació especificada. Principalment interessarà localitzar, en els gràfics de tensions, les parts més crítiques i raonar la seva procedència. Tanmateix, també serà interessant observar els moviments i deformacions globals del Patí davant aquesta situació.

1) Gràfic de deformacions (*Deformed Shape*).

A continuació es podrà observar la deformació completa a escala real del Patí de Vela una vegada aplicada la càrrega de 53N/m^2 .

Principalment es pot observar la deformació del teixit de la vela formant la corba clàssica que permet impulsar l'embarcació. També es poden apreciar els estiraments del mànstil i sistema d'eixàrcies en la direcció del vent, lluitant per a vèncer el volum de vent modelitzat.

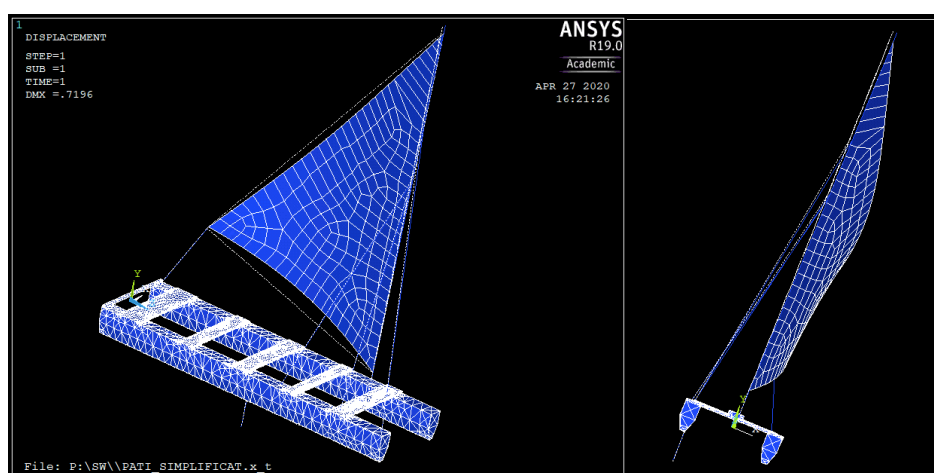


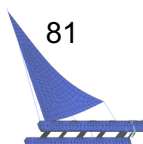
Figura 58: Gràfic de deformacions del global del Patí

2) Mapa de desplaçaments nodals *UX* i *UY*.

A continuació es podran observar els gràfics dels camps de desplaçaments a escala real del Patí de Vela una vegada aplicada la càrrega de 53N/m^2 .

Si s'observa l'embarcació al complet (*Figures 59 i 60 part esquerre*), la gran majoria de desplaçaments importants queden plasmatats sobre la vela i per tant no se'n pot observar la seva reacció sobre l'estructura.

Tanmateix, si s'extreuen la vela i l'escota del gràfic (*Figures 59 i 60 part dreta*), es podrà observar amb molta més precisió com horitzontalment el mànstil és el que adopta els majors desplaçaments i verticalment ho és la part davantera del flotador dret on justament és enganxada l'eixàrcia.



Per últim, també es podrà observar el mapa del mòdul dels vectors desplaçament (*USUM*, *Figura 61*) on es podrà observar el desplaçament màxim (*DMX*) clarament indicat de color vermell.

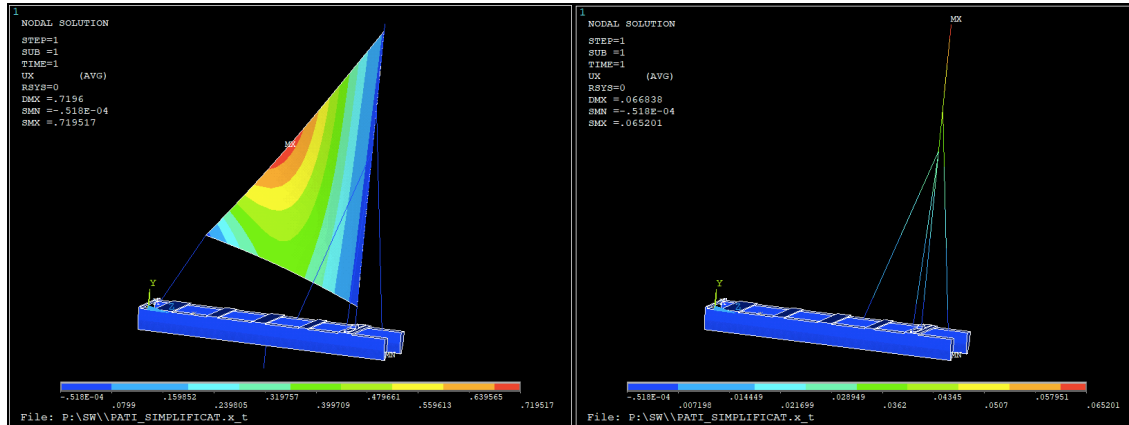


Figura 59: Mapa de desplaçaments horitzontals UX

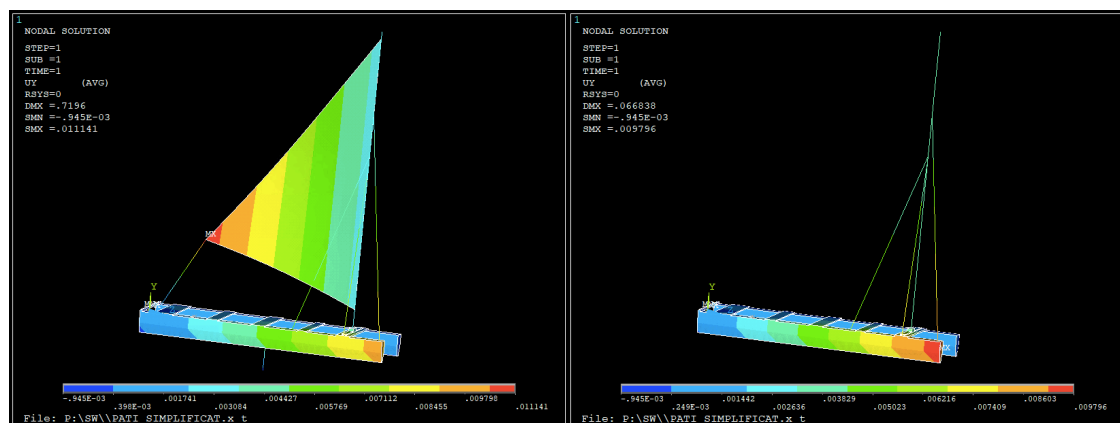


Figura 60: Mapa de desplaçaments verticals UY

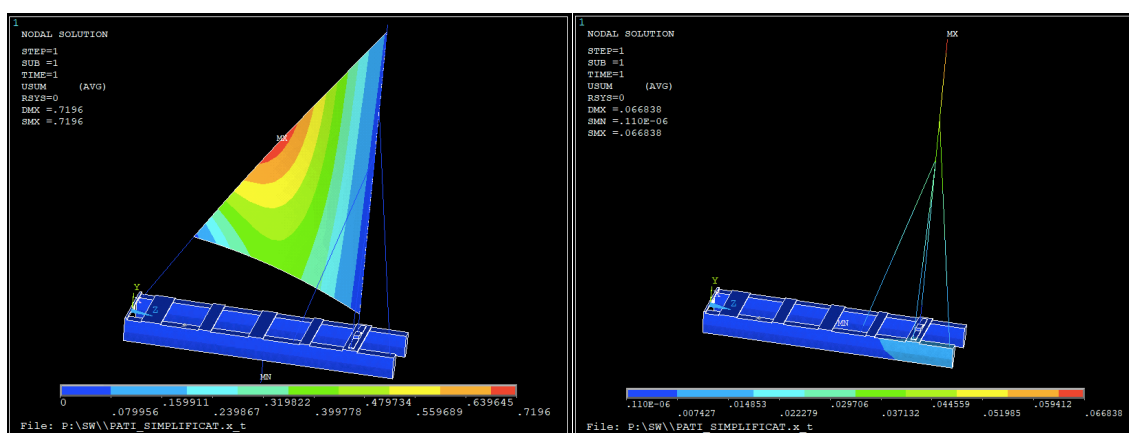
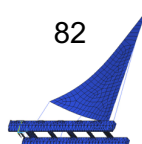


Figura 61: Mapa del mòdul dels vectors desplaçament (USUM)



3) Gràfic de les tensions principals 1

En el cas de les tensions en la direcció principal 1 (S_1), aquestes mostren el seus màxims de compressió i tracció en la barra d'escota i a la vela respectivament.. Aquests valors màxims corresponen a $-2,8\text{MPa}$ en la barra d'escota, i $59,3\text{MPa}$ a la unió més baixa de la vela amb el màstil (en cap cas es superen els límits elàstics de cada material).

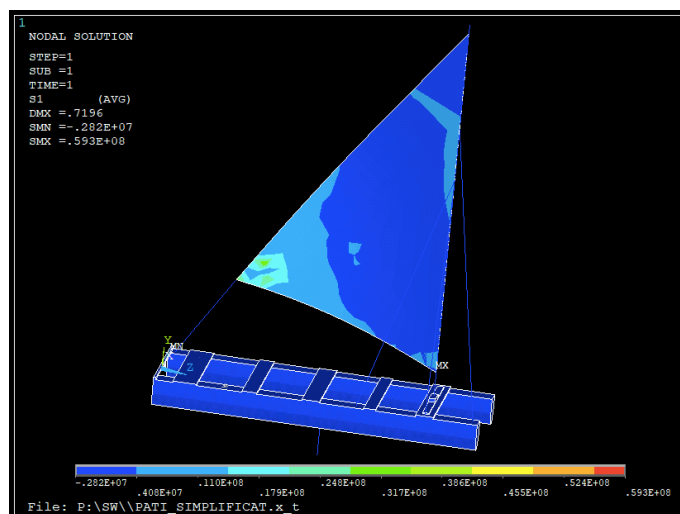


Figura 62: Mapa distribució de tensions principals S_1

4) Gràfic de les tensions principals 3

En el cas de les tensions en la direcció principal 3 (S_3), aquestes mostren el seus màxims de compressió i tracció en la vela i els flotadors respectivament. Aquests valors màxims corresponen a $-53,4\text{MPa}$ a la vela, i $2,9\text{MPa}$ a la unió més baixa de la vela amb el màstil (en cap cas es superen els límits elàstics de cada material).

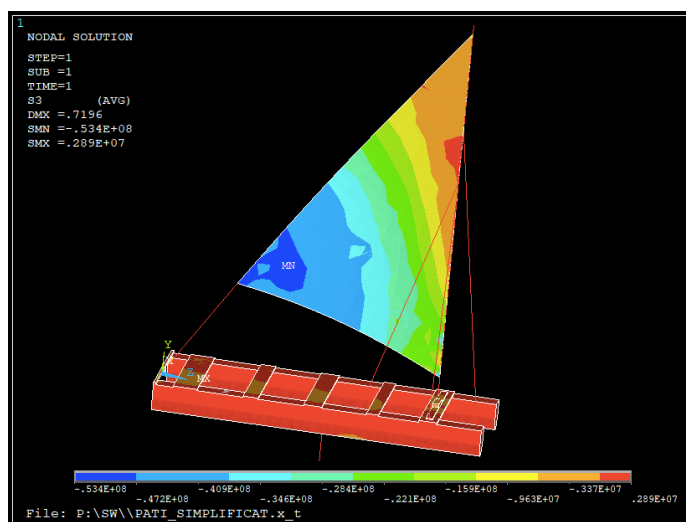
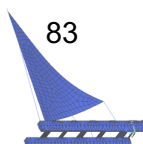


Figura 63: Mapa distribució de tensions principals S_3



5) Gràfic de les tensions equivalents de *Von-Mises*

Les tensions equivalents de *Von-Mises* (SEQV) representen una agrupació de totes les tensions multidireccionals en una de sola equivalent.

Tanmateix en el cas del Patí, aquesta agrupació resulta molt útil gràficament, ja que, permet observar (*Figures 64 i 65*) els components del Patí que realment estant patint la major part dels esforços. Concretament, s'observa que la barra d'escota, les bancades (excepte la segona) i la base del màstil són els elements que més tensions estan patint.

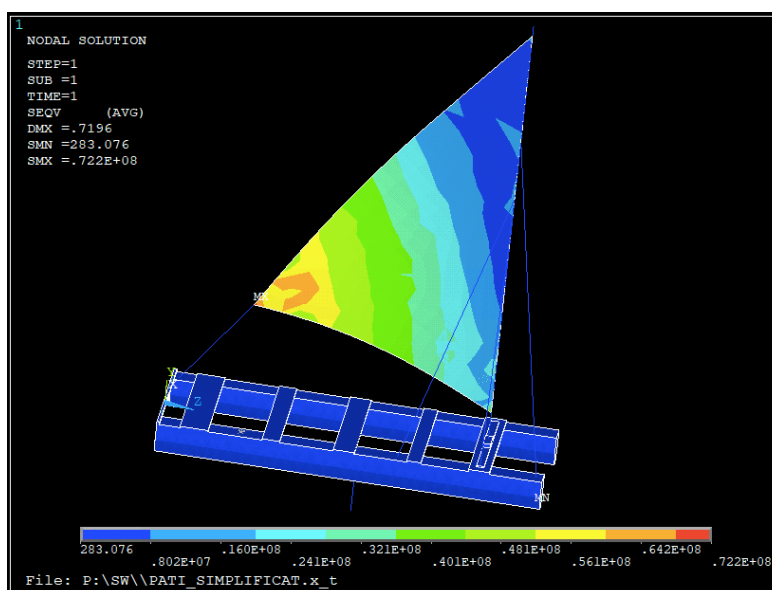


Figura 64: Mapa distribució de tensions de Von-Mises SEQV

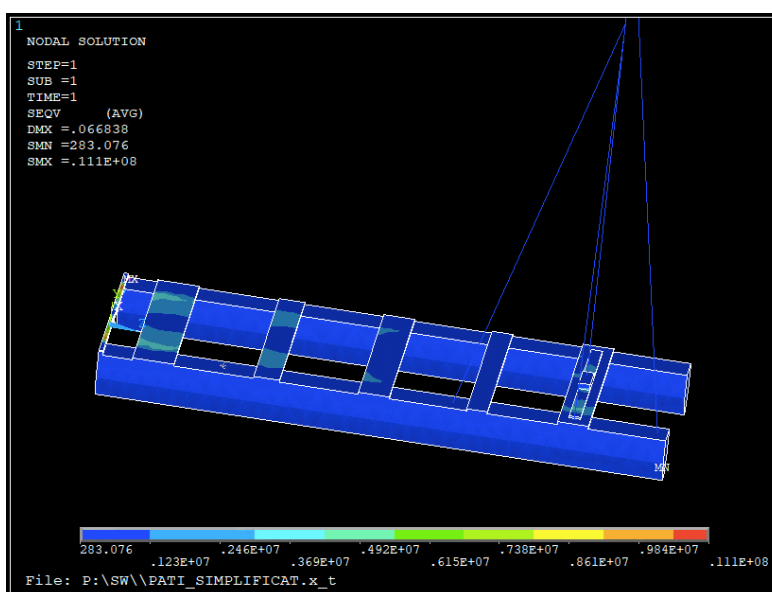
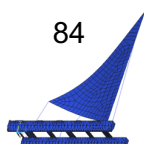


Figura 65: Mapa distribució de tensions de Von-Mises SEQV (sense màstil i escota)



7.9.2 Anàlisi Parcial

En aquest apartat es desglossarà cadascuna de les entitats principals que conformen el Patí per analitzar-les per separat. S'estudiaran individualment el màstil, el conjunt de bancada i flotadors, i la barra d'escota. La resta d'elements s'han considerat eines del model que no tenen importància a nivell estructural.

Màstil

La primera entitat a estudiar per separat serà el màstil. Per a l'estudi d'aquest, s'analitzaran altre cop els sis gràfics comentats durant l'anàlisi global del Patí.

Pel que fa al desplaçament o **forma deformada** del màstil (*Figura 66*), en aquesta es pot observar el moviment lateral esperat cap a la direcció on va el vent. El desplaçament màxim es dona a la punta del màstil i és de 6,68 cm quasi horitzontalment.

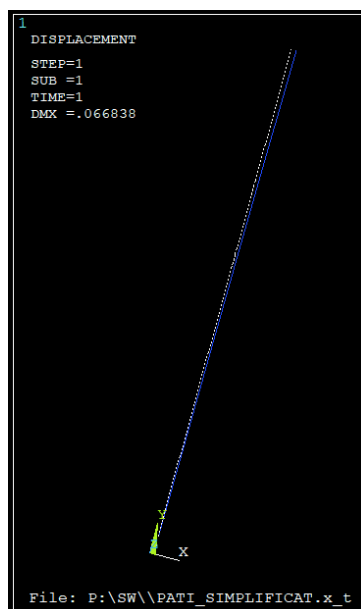


Figura 66: Gràfic de deformacions del màstil

Seguint amb els **mapes de desplaçament nodals en els eixos X i Y**, d'una banda, en el que seria la direcció horitzontal (eix X, *Figura 67*), es pot observar com el màstil evoluciona cap a la direcció on va el vent desplaçant-se fins a 8,23 cm en el cas del node més alt del màstil.

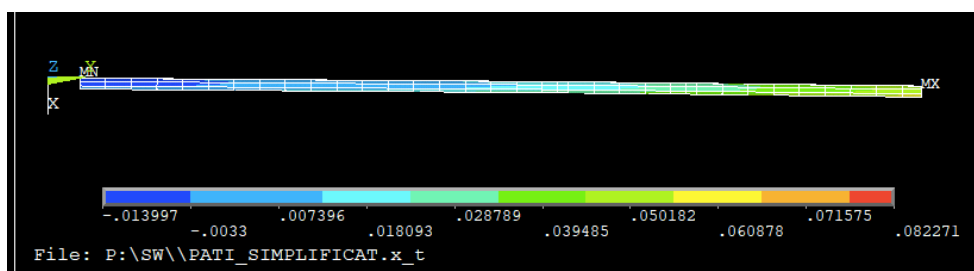


Figura 67: Mapa de desplaçaments horitzontals UX del màstil

D'altra banda, pel que fa a la direcció vertical (Figura 68), tan sols es poden apreciar uns petits desplaçaments a la punta del màstil, resultat de la torsió o desplaçament en la direcció horitzontal.

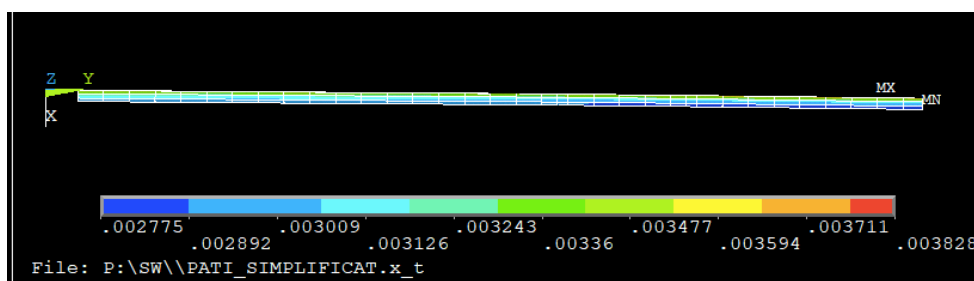
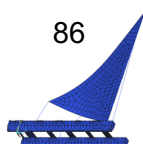


Figura 68: Mapa de desplaçaments verticals UY del màstil

Seguint amb l'anàlisi de les tensions principals, en aquest cas destaquen dos singularitats que es poden fàcilment observar en les Figures 69 i 70:

- Primer de tot, donada la corba que modelitza el màstil al desplaçar-se en la direcció del vent, es presentaran dos tipus de d'estats dels elements. En primer lloc, els elements que es trobin a la part interior de la corba treballaran a compressió. Altrament, els que es trobin a l'exterior, treballaran a tracció.
- D'altra banda, en ambdós mapes de distribucions de tensions principals 1 i 3, es trobaran els màxim de tracció i compressió respectivament en el mateix punt. Aquest punt coincideix justament amb el punt d'unió amb un dels cables de l'eixàrcia, exactament el cable que recolze més a la popa del Patí.



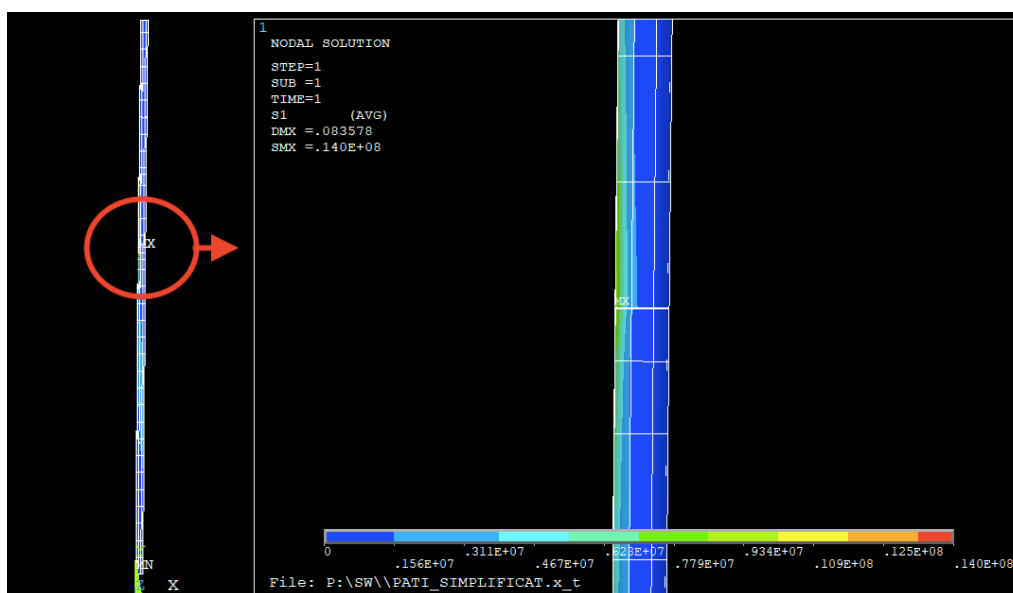


Figura 69: Mapa distribució de tensions principals S1 del màstil

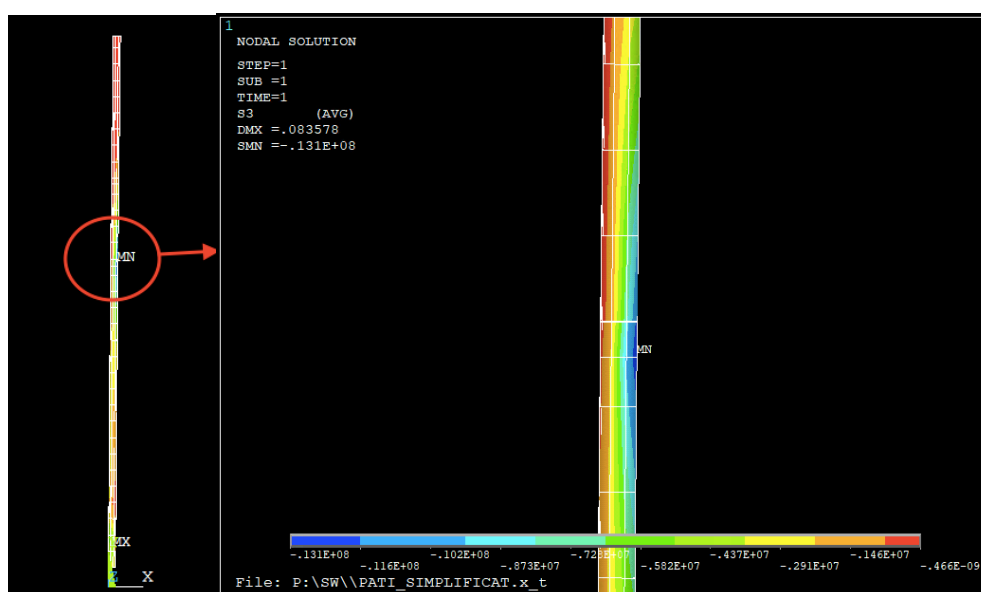
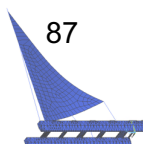


Figura 70: Mapa distribució de tensions principals S3 del màstil

Per últim, pel que fa a les **tensions equivalents de Von-Mises**, donat que en els anteriors mapes de tensions principals s'han observat les tensions més significatives a la mateixa alçada, a les tensions equivalents de *Von-Mises* també s'hi veurà fortament reflectit aquest punt. Efectivament, en la *Figura 71*, s'observen en valor absolut els majors esforços concentrats al voltant d'aquesta unió màstil-cable. Es creu que aquesta reacció del cable probablement es per la tendència del màstil a avançar en la direcció Z positiva com a conseqüència de la forma que agafa la vela al rebre el vent.



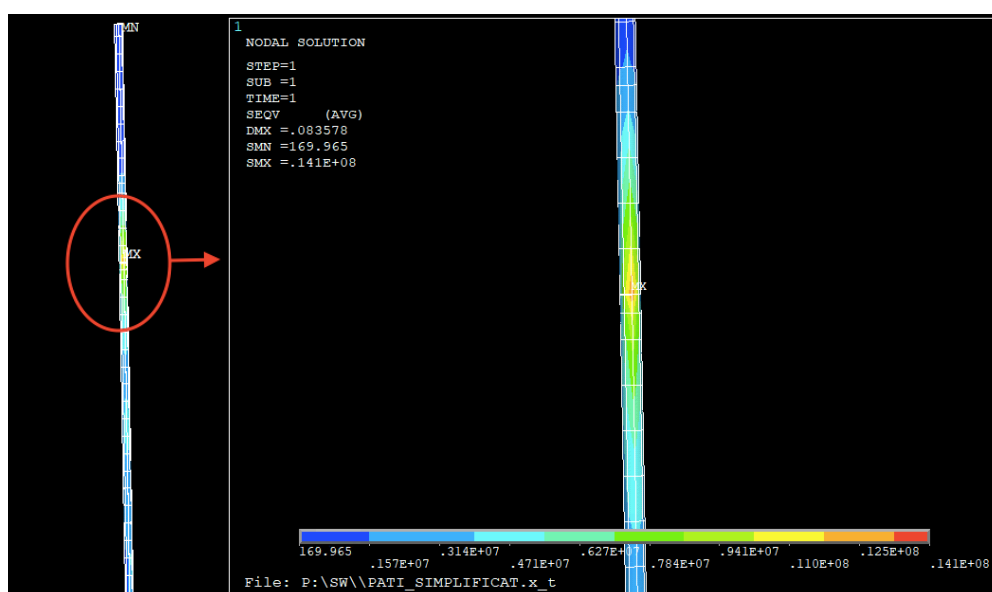


Figura 71: Mapa distribució de tensions equivalents de Von-Mises del màstil

Finalment es pot concloure que tot i les altes tensions localitzades en el màstil, en cap cas es sobrepassa el límit elàstic de l'alumini (55 MPa).

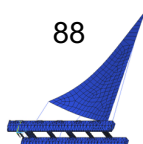
Conjunt bancades i flotadors

A continuació s'analitzarà el conjunt de bancades i flotadors seguint el mateix procediment que en els anteriors apartats.

Donat que el conjunt de bancades i flotadors ha estat mallat de forma homogènia amb els mateixos elements i materials, no ha estat possible realitzar un estudi per separat. Tanmateix, en el cas d'observar alguna singularitat en un component que no es pugui apreciar, s'intentarà aïllar-lo seleccionant-lo element a element per al corresponent anàlisi.

A continuació, donat que en els gràfics de deformacions a escala real no es podia apreciar quasi res, es mostrarà el **gràfic de desplaçaments i deformacions** en versió exagerada (*auto-calculated*).

Com molt bé es pot observar en la Figura 72, la base del Patí experimenta una torsió provocada per les tensions de l'eixàrcia i pel pes del tripulant. Aquest moviment resulta molt habitual en el món del Patí de Vela real, i es una de les raons per les quals és necessària una alta elasticitat en les fustes utilitzades.



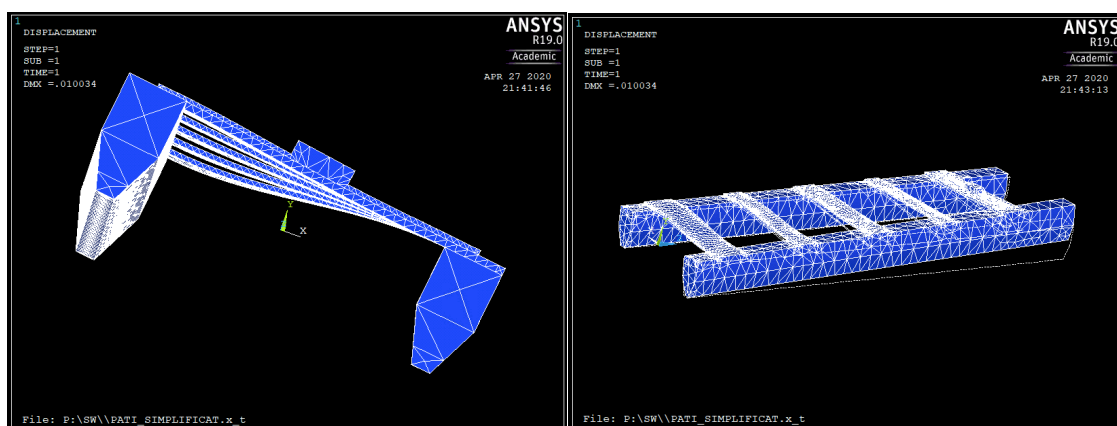


Figura 72: Gràfic de deformacions del conjunt bancades + flotadors

Continuant amb els camps de desplaçaments horitzontals i verticals, en les Figures 73 i 74 es podrà altre cop observar i corroborar el fenomen de la torsió. A més a més, caldrà comentar els següents dos aspectes:

- En primer lloc, en la Figura 73 destaca clarament el peu del màstil amb uns desplaçaments de quasi 3 mm en la direcció del vent.
- Després, resulta molt important destacar la gran feina de flexió que realitzen les bancades. Aquestes, contempen diferències d'altura de quasi 9 mm entre banda i banda, i s'adapten a la perfecció als moviments dels flotadors.

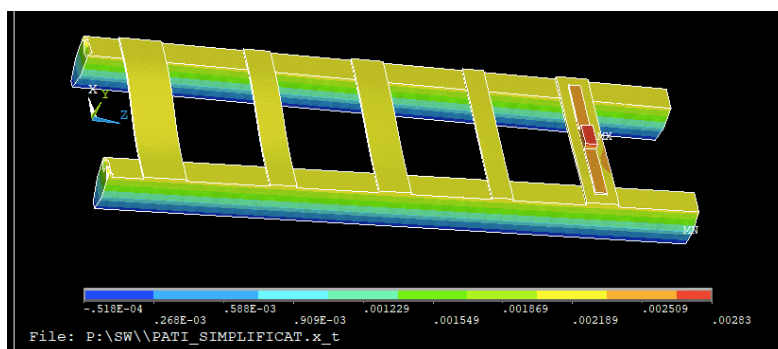


Figura 73: Mapa de desplaçaments horitzontals UX del conjunt bancades + flotadors

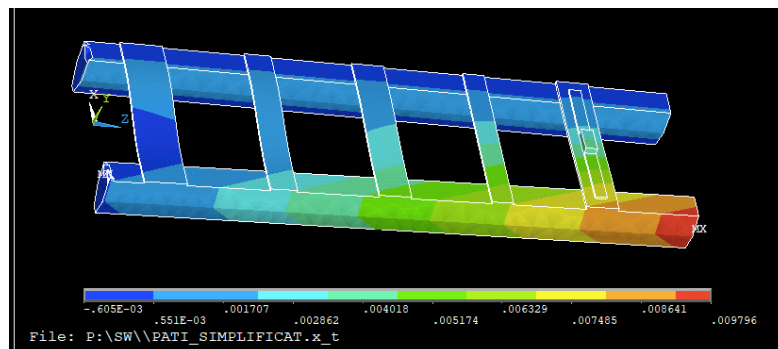


Figura 74: Mapa de desplaçaments verticals UY del conjunt bancades + flotadors

Per a l'estudi de les tensions, s'analitzarà únicament el mapa de **tensions equivalents de Von-Mises**, ja que resumeix el conjunt de totes les tensions en totes les direccions i a més a més, en aquest cas, resulta molt més intuïtiu visualment. Tanmateix es podrà accedir a les figures corresponents als mapes de les tensions principals als Annexes corresponents.

Pel que fa al mapa de tensions equivalents de Von-Mises (*Figura 75*), es farà referència a 3 aspectes principalment:

- Primer, pel que fa a la unió dels flotadors amb la barra d'escota, s'observa un pic màxim de tensions que, tot i semblar una simple singularitat, representa una de les zones amb més tensions internes a suportar. Això és degut a la gran força que ha de suportar aquesta barra. De fet, també resulta una de les raons per les quals els suports de la barra d'escota són tan robusts en general.
- També resulten rellevants les bancades 4 i 5 que denoten un pics de tensions de l'ordre dels quasi 4 MPa donades les grans feines de flexió que han de realitzar.
- Per últim, també apareixen grans pics de tensions a la primera bancada com a reaccions dels grans desplaçaments observats en la *Figura 74*. Tot i així, per ser la base que suporta tot el màstil i a la vegada el punt amb més desplaçaments verticals, s'observa com el reforçament de la bancada afronta amb molt bon resultat les adversitats de la situació plantejada.

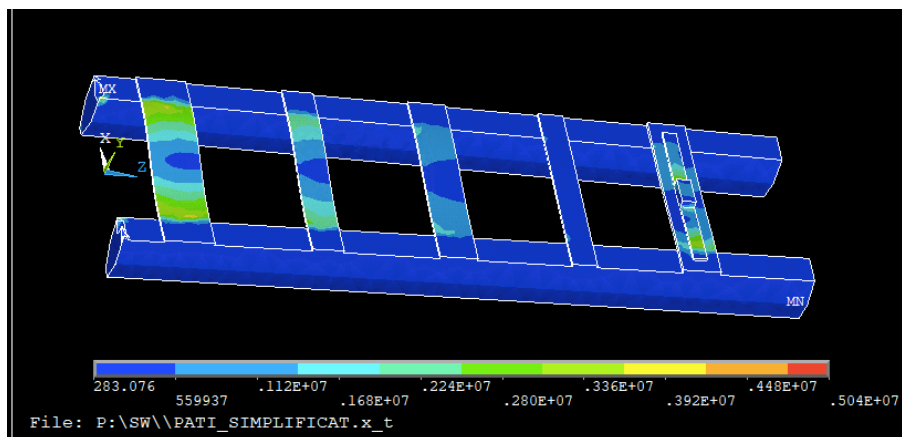
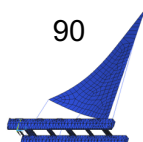


Figura 75: Mapa distribució de tensions de Von-Mises del conjunt bancades + flotadors



Barra d'escota

Pel que fa a l'estudi de la barra d'escota, al tractar-se d'analitzar una barra rígida acer inoxidable, no es comentaran els gràfics de desplaçaments, ja que aquests no arriben ni a desplaçaments d'1 mm en la major part de la barra.

Pel que fa a l'anàlisi de les tensions principals d'aquesta barra, a continuació s'exposaran una sèrie d'aspectes que han resultat rellevants una vegada observades les *Figures 76 i 77*.

- Primer, s'observa un a espècie de forma cònica a la part esquerra de la barra la qual mostra en ambdós gràfics els pics majors de tensions. Tot i així, aquesta singularitat no es més que un error de mallat que ha falsejat els resultats al deixar un forat interior. Tanmateix, no es tindrà en compte aquesta singularitat. Tampoc es tindran en compte les imperfeccions del lateral esquerre de la barra.
- Si s'observa a la part dreta d'ambdós figures, es podrà observar la zona de treball de l'escota. D'una banda, la barra mostra altes tensions (10,5 MPa, *Figura 76*) de tracció com a reacció a la subjecció de la vela. D'altra banda, la barra pateix esforços de compressió (-9,6 MPa, *Figura 77*).

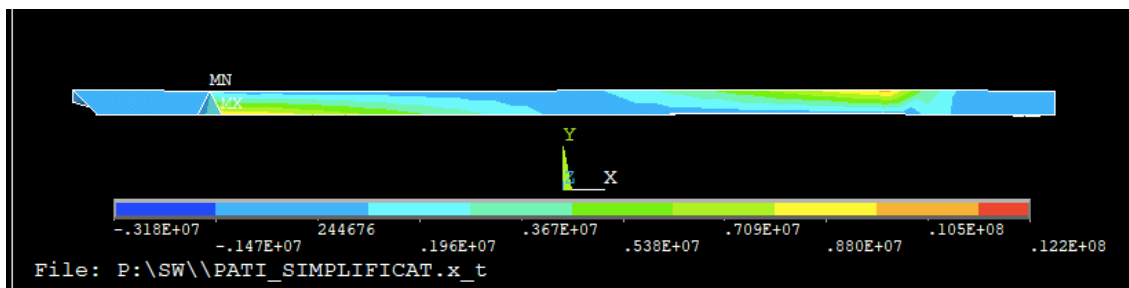


Figura 76: Mapa distribució de tensions principals S1 de la barra d'escota

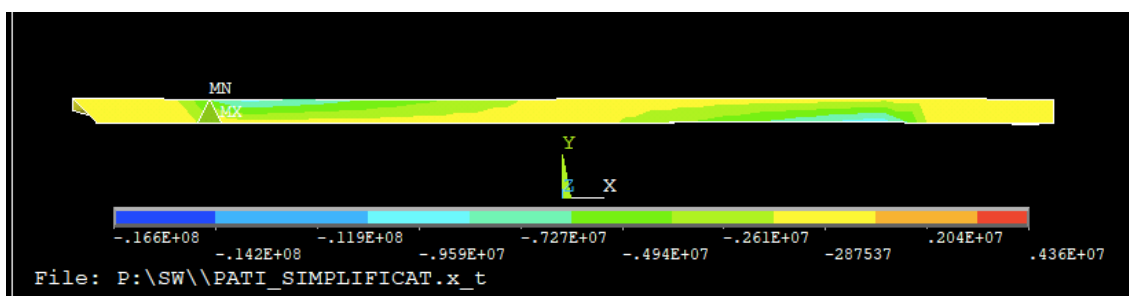
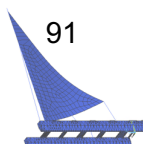


Figura 77: Mapa distribució de tensions principals S3 de la barra d'escota



Per últim, pel que fa a les tensions equivalents de *Von-Mises* (Figura 78), tampoc resulten de gran ajuda perquè mostren com a tensions majors les singularitats anteriorment comentades que falsegen els resultats. Tanmateix, es pot tornar a observar la zona de contacte amb l'escota que es on s'assoleixen veritablement les tensions majors.

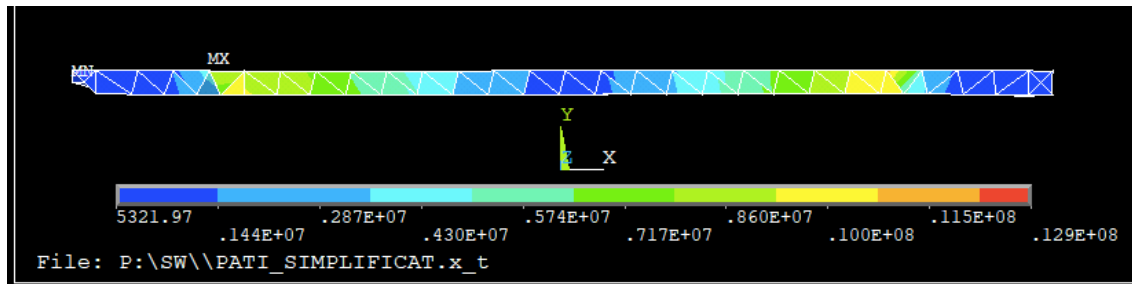


Figura 78 Mapa distribució de tensions equivalents de *Von-Mises* de la barra d'escota



7.10 Interpretació dels resultats

En aquest apartat s'interpretaran els resultats obtinguts en la simulació final amb l'objectiu de donar una visió global sobre la resistència del Patí de Vela.

Primer de tot, es comentaran els **errors o inexactituds** que han sorgit en el model i no han estat possibles d'eradicar. Tanmateix, s'ha intentat que aquests afectin mínimament a l'anàlisi estructural.

- D'es d'un primer moment el modelatge de la vela ha estat un dels punts més complicats del treball. Tanmateix, després d'infinat de canvis i modificacions s'ha observat que la vela després de ser simulada no evoluciona correctament en la petita regió triangular on s'annexa l'escota. Aquesta regió no es desplaça suficientment en l'eix horitzontal i per tant molts esforços de la vela hauran agafat direccions errònies.
- Al utilitzar el model simplificat de Patí de Vela per a les simulacions, s'ha estat treballant amb un model de barra d'escota excessivament simplificat que posteriorment ha mostrat algun error o pics de tensions incorrectes.
- Per últim, recordar que la metodologia utilitzada per a definir el moviment del tripulant a mesura que s'elevava l'angle d'escora, era de caire discreta i no continua. Tanmateix, han sorgit dades (exemple inclinació de 40 graus) que efectivament són explicables a nivell mecànic, però que en la realitat mai passarien.

A continuació s'interpretaran cadascuna de les parts analitzades i després se'n farà un comentari global.

Pel que fa al **màstil**, s'ha observat principalment una tendència a l'avanç en la direcció Z, que ha provocat una gran concentració de tensions en la zona de subjecció del cable de l'eixàrcia de popa. Tanmateix, es proposaria un petit revestiment o reforçament de totes les zones de subjecció de l'eixàrcia, ja que en funció del rumb de navegació, canviarà el cable més crític. D'aquesta manera es podrien evitar futures fallides del màstil en aquestes zones més crítiques.

Pel que fa a les **bancades**, s'han observat els majors pics de tensions en les bancades 1, 4 i 5, en les zones properes a la unió amb els flotadors, probablement provocades pels treballs de torsió de la embarcació. Tanmateix, seria també útil reforçar aquestes zones.

Per últim, comentar que resultaria útil reforçar ambdós extrems de la **barra d'escota**, ja que, és on s'acumulen les altes tensions resultants d'aquest cap.

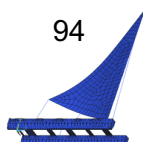
8 Impacte ambiental i econòmic

8.1 Impacte ambiental

Donat que el projecte ha estat de caire teòric on la pràctica s'ha realitzat amb eines de simulació, l'impacte a nivell ambiental que s'hagi provocat serà mínim. Aquesta és una de les raons per a les quals la simulació resulta una gran eina de treball, doncs en un hipotètic cas de simulació real amb túnels de vent l'impacte que es provocaria seria molt més elevat.

Pel que fa al projecte realitzat, l'impacte ambiental provindrà bàsicament del consum elèctric generat pels ordinadors utilitzats, així com del desgast dels components electrònics d'aquests. També s'afegiria tot el material d'escriptura com ara bolígrafs i fulls que s'han utilitzat per a realitzar càlculs i esbossos del projecte. Per últim, també s'haurà emès un extra de CO₂ pels transports utilitzats en l'assistència a la universitat els dies exclusius d'estudi del projecte (metro, autobús i cotxe).

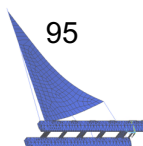
Per a concloure, citar que l'acció de navegar en Patí de Vela no provoca cap tipus d'impacte mediambiental. Contràriament, es tracta d'una activitat que treu profit dels avantatges de la naturalesa per a impulsar-se i crear moviment.



8.2 Estudi econòmic

Respecte al impacte econòmic que suposaria aquest projecte, aquest es detallarà suposant un encàrrec d'una empresa nàutica externa. D'aquesta manera, es detallaran cadascuna de les despeses incloent-hi els materials proporcionats per la universitat així com el salari del enginyer entre d'altres. A continuació es desglossaran cadascun dels factors econòmics implicats al projecte:

1. Despesa corresponent a la feina de l'enginyer. Es tindran en compte dos paràmetres, el salari d'aquest i les hores treballades totals.
 - a. Donat que el salari d'un enginyer Industrial pot variar molt, s'utilitzarà un salari mig de **30€/h**, el qual correspondria a un Enginyer treballant en investigació.
 - b. Pel que fa a les hores treballades, es partirà del valor base de 300 hores (corresponents als crèdits ECTS del projecte) i se li sumaran 50 hores extra pel període de pròrroga realitzat i imprevistos. Tanmateix es parlarà d'un total de 350 hores.
2. Despesa corresponent a les llicències de softwares adquirides. En aquest apartat es parlarà les programaris: *MicrosoftOffice365*, *SolidWorks* i *ANSYS*.
 - a. El pla més senzill de *MicorsoftOffice365* ofereix les eines bàsiques amb les que s'ha treballat durant el projecte (*Word*, *Excel* i *PowerPoint*) i té un cost mensual de **8,80€/mes** [8]. Es parlarà de 8 mesos durant els quals ha estat necessària aquesta eina.
 - b. En el cas de l'eina de disseny *SolidWorks Standard 2019*, l'empresa CAD proposa la opció de lloguer per **1010€** cada 3 mesos [8]. Tanmateix, tot i la intermitència de la utilització d'aquesta eina al llarg del projecte, es necessitaran com a mínim 5 mesos.
 - c. Pel que fa als diferents softwares de simulació d'ANSYS utilitzats en aquest projecte: *Aim*, *Workbench Classic* i *APDL*, el seu cost total oscil·la al voltant dels 10000€/any . Per tant, en 3 mesos d'utilització es pagaran **2500€**.
3. Despesa de lloguer d'una oficina de treball. Donat que el lloguer d'una parcel·la d'oficina de *Coworking* costa uns 150€/mes de mitja a Barcelona [8], el total del lloguer de 8 mesos resultarà de **1200€**.
4. Despesa de material de treball (fulls, bolígrafs i ordinador). Per al càlcul del cost de l'ordinador, s'agafarà el preu base i es dividirà per una vida útil de 8 anys, dels quals se'n calcularà la porció de 8 mesos de projecte. En total, es parlarà de **110€** en material.
5. Consum energètic. Suposant un preu de **0,153€/kWh** i 350 hores.

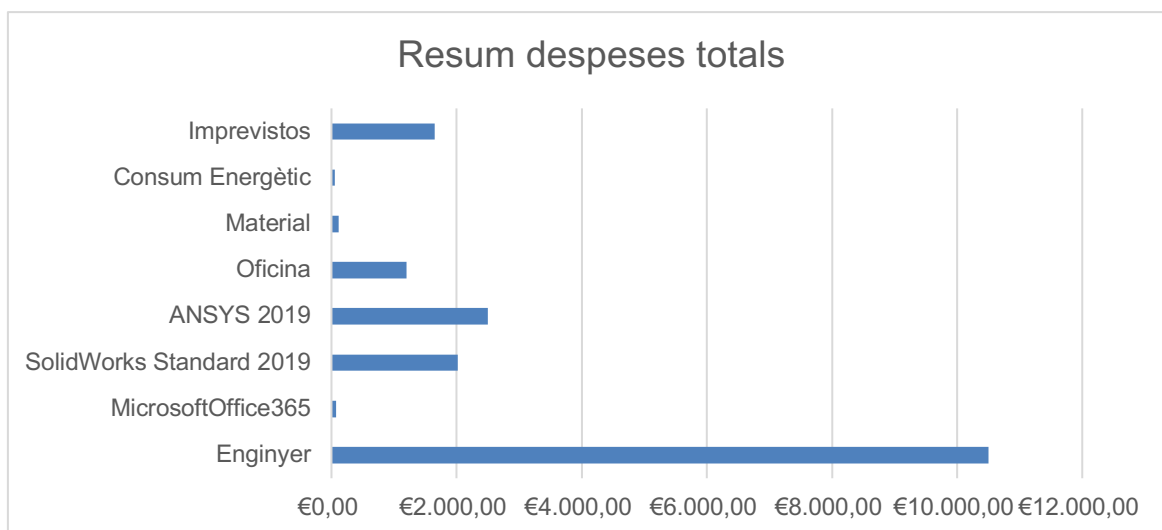


Finalment, una vegada desglossades les despeses del projecte, s'han agrupat en una taula (*Taula 6*) i se n'ha calculat el total de del projecte que ha resultat de **26349,35€**.

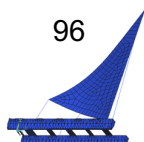
Despeses	Cost unitari	Temps invertit	Total
Enginyer	30,00€/h	350 h	10.500,00€
MicrosoftOffice365	8,80€/mes	8 mesos	70,40€
SolidWorks Standard 2019	1.010,00€/3mesos	5 mesos	2.020,00€
ANSYS 2019	10000,00/any	3 mesos	2.500,00€
Oficina	150,00€/mes	8 mesos	1.200,00€
Material	110,00€	-	110,00€
Consum Energètic	0,153€/kWh	350 h	53,55€
Cost TOTAL ideal			16.453,95€
Imprevistos	10% del total		1.645,40€
Cost TOTAL			18099,35€

Tabla 29: Taula resum de les despeses del projecte

A és a més, s'ha realitzat un gràfic de barres (*Gràfic 1*) per a poder detectar les despeses més determinants del projecte. Tanmateix, es pot observar com la feina de l'Enginyer engloba el quasi total de costos del projecte. Seguidament, també suposaran un cost important les llicències d'ANSYS i SolidWorks.



Gràfic 1: Desglossament de les despeses totals



9 Programació

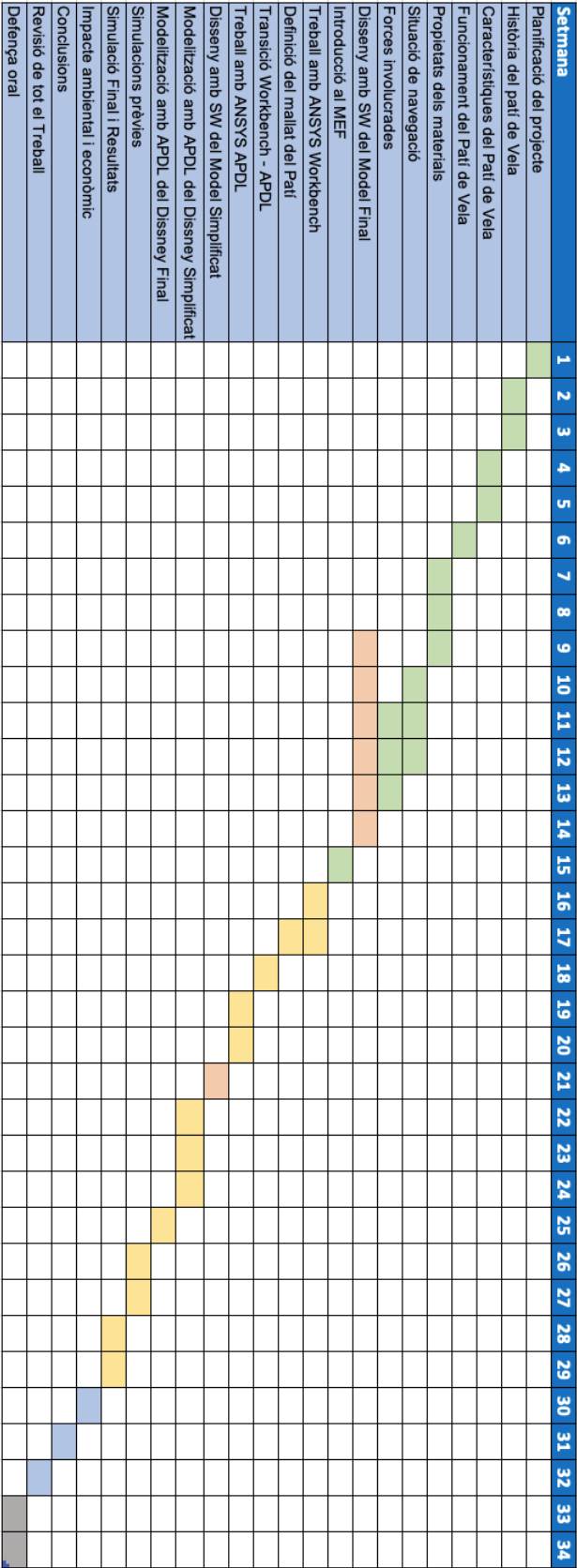
Aquest projecte es va iniciar a mitjans de Setembre de 2019 i tenia data final a mitjans de Gener de 2019. Tanmateix, donada la feina escolar amb la que es va haver de compaginar el treball en el quadrimestre de tardor, totes les durades de les tasques programades es van allargar i com a conseqüent es va haver de demanar una pròrroga fins a finals d'Abril. En total, un global de quasi **34 setmanes**.

A continuació es desglossaran cronològicament totes i cadascuna de les tasques que han constituït aquest treball (*Taula 30*) exposant-ne les seves respectives duracions equivalents. Després, s'exposarà el seu *Diagrama de Gantt*¹¹ corresponent en forma de taula (*Gràfic 1*).

Tasca	Tipus	Setmana d'inici	Duració	Data fi
Planificació del projecte	Recerca i Redacció	1	1	2
Història del Patí de Vela	Recerca i Redacció	2	2	4
Característiques del Patí de Vela	Recerca i Redacció	4	2	6
Funcionament del Patí de Vela	Recerca i Redacció	6	1	7
Propietats dels materials	Recerca i Redacció	7	3	10
Situació de navegació	Recerca i Redacció	10	3	13
Forces involucrades	Recerca i Redacció	11	3	14
Disseny amb SW del Model Final	Treball amb SolidWorks	10	5	15
Introducció al MEF	Recerca i Redacció	15	1	16
Treball amb ANSYS Workbench	Treball amb ANSYS	16	2	18
Definició del mallat del Patí	Treball amb ANSYS	17	1	18
Transició Workbench - APDL	Treball amb ANSYS	18	1	19
Treball amb ANSYS APDL	Treball amb ANSYS	19	2	21
Disseny amb SW del Model Simplificat	Treball amb SolidWorks	21	1	22
Modelització amb APDL del Disseny Simplificat	Treball amb ANSYS	22	3	25
Modelització amb APDL del Disseny Final	Treball amb ANSYS	25	1	26
Simulacions prèvies	Treball amb ANSYS	26	2	28
Simulació Final i Resultats	Treball amb ANSYS	28	2	30
Impacte ambiental i econòmic	Redacció	30	1	31
Conclusions	Redacció	30	1	31
Revisió de tot el Treball	Redacció	31	1	32
Defensa oral	Defensa Oral	32	2	34

Taula 30: Tasques i duracions que han constituït el projecte

¹¹ **Diagrama de Gantt:** Es tracta d'un eina gràfica l'objectiu de la qual és exposar les duracions planificades de les diferents tasques d'un projecte.



Taula 31: Diagrama de Gantt del Projecte

10 Conclusions i línies futures

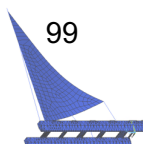
Una vegada finalitzades totes les etapes del treball i tanmateix haver assolit la gran majoria dels objectius proposats, es disposarà a extreure'n les corresponents conclusions.

Respecte del primer objectiu de recerca i estudi teòric de la embarcació, comentar que tot i haver estat suficient per a la realització del treball, en molts casos ha resultat difícil accedir a certa informació. Tanmateix, s'ha recorregut en molts casos a mètodes més arcaics d'accés d'informació com pot ser preguntant a experts patinaires sobre especificacions tècniques o mesurant personalment i en fotografies certes distàncies i formes.

Pel que fa a la pràctica, aprenentatge i modelització amb els softwares d'ANSYS, es pot afirmar que tot i no poder resoldre els problemes amb el *Model Final* i haver hagut de treballar amb el *Model Simplificat*, s'ha assolit un domini i agilitat amb el programari que eren impensables en un principi del projecte. Gràcies a això, ha estat possible realitzar una gran quantitat de proves i correccions que han donat lloc a les simulacions exposades al llarg del treball.

Per últim, fent referència a tota la fase simulació, anàlisi i resultats, justificar que donats els ambiciosos objectius de voler donar solució al problema estructural del Patí de Vela, no ha estat possible profunditzar més en la manera de resoldre els problemes estructurals trobats. No obstant, s'ha arribat a analitzar amb èxit cada component estructural de la embarcació sense sobrepassar en cap moment els límits elàstics dels materials utilitzats, i tanmateix, s'ha aconseguit destacar les zones més crítiques de cada part estudiada. Per a concloure, també reconèixer la bona feina de modelització de la embarcació i de la situació de navegació, per les quals s'han obtingut uns resultats molt semblants a la navegació real amb Patí de Vela.

Finalment, exposar que d'haver tingut més disponibilitat en quant a temps i a recursos (donada la present pandèmia de COVID19 i les restriccions que ha comportat en tots els àmbits), hagués estat interessant investigar i posteriorment simular, les possibles millores exposades, entre d'altres. També, hagués resultat interessant estudiar altres situacions de risc de la embarcació com la bolcada o el xoc sec contra grans onades.



11 Agraïments

Aquest apartat el voldria dedicar a totes aquelles persones que han fet possible aquest treball.

En primer lloc, voldria agrair al professor Francesc Roure Fernández, coordinador del departament de Resistència de Material i actual director del projecte, per la possibilitat que m'ha brindat de realitzar aquest treball. També agraeixo els diferents punts de vista i solucions que m'ha aportat al llarg del transcurs del projecte. Per últim, també agrair-li les múltiples facilitats que m'ha brindat per a poder treballar amb els ordinadors i programes adients, tant a la universitat com a casa.

En segon lloc, voldria agrair a la família i amics per la perseverança i constant preocupació pel desenvolupament del treball. També pels llargs debats sobre importants especificacions de modelatge del Patí, gràcies als quals es van poder prendre millors decisions.

Després, agrair als diferents experts *patinaires* del Club de Vela Sant Antoni, per propiciar-me informacions crucials referents a l'experiència nàutica.

També, agrair al departaments de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria per facilitar-me un lloc de treball al seu pavelló i per ajudar-me amb diferents problemes de caire informàtic i de simulació amb ANSYS en certes ocasions. Concretament agrair al meu ex-professor de Resistència de Materials, Jordi Bonada, per la seva ajuda en certes qüestions relatives a ANSYS.

Per últim, m'agradaria agrair la col·laboració de la meva ex-professora d'Expressió Gràfica, Arantza Villa, per la seva ajuda en la resolució de certs problemes de disseny amb SolidWorks.

A tots ells, els intentaré fer arribar una còpia del projecte com agraïment.

12 Bibliografia

Referències Bibliogràfiques

A continuació s'exposaran els diferents llibres que s'han utilitzat com a guia en el treball i han estat essencials per a les tasques de recerca.

- *El patín a vela*, Guido Depoorter. Data de publicació original: 1974.
- *ANSYS Mechanical APDL for Finite Element Analysis*, Mary Kathryn i John Martin. Edició 2017.

Bibliografia Complementaria

A continuació es desglossaran els diferents llocs web utilitzats per a la realització del present treball. Molts d'ells es trobaran referenciats al llarg de la memòria, però d'altres s'han utilitzat com simples guies d'autoaprenentatge i per tant no es trobaran referenciades en el text.

[1] Lloc web de referencia *Adipav*:

- <http://www.adipav.org/>

[2] Reglament Sénior del lloc web Adipav:

- http://www.adipav.org/sites/default/files/20180203_2018Reglamento%20de%20la%20Disciplina%20Pat%C3%ADn%20a%20Vela%20negre%20%281%29.pdf

[3] Wikipèdia, Patí de Vela:

- https://ca.wikipedia.org/wiki/Pat%C3%ADn_de_vela

[4] Youtube, tutorials d'ANSYS APDL:

- https://www.youtube.com/watch?v=VKRGtG_hpiq&list=PLQVMpQ7G7XvGz9PUEuO4aZVcj9UrYZYq
- <https://www.youtube.com/watch?v=uDPaiEIWd0E&list=PLq0dftOnIMLSxrlG5Ef5rouCCLuG8Bbzg>

[5] Informació sobre els materials:

Fusta

- <https://www.gabarro.com/es/>
- <https://maderame.com/madera-samba-ayous-caracteristicas-usos/>
- https://infomadera.net/uploads/productos/informacion_general_126_Madera%20Laminada%20Ecolada_18.07.2011.pdf
- <https://www.maderasmedina.com/fichas-propiedades/maderas-tropicales/acajou.html#>
- <https://docplayer.es/47077653-Diseno-y-analisis-estructural-de-un-patin-catalan.html>

Alumini:

- https://en.wikipedia.org/wiki/6061_aluminium_alloy
- <https://www.alu-stock.es/multimedia/descargas/14/Cap11-Aleaciones-de-aluminio.pdf>

- [https://www.alacermas.com/img/galeria/files/aluminio/chapa_6061_aluminio\(1\).pdf](https://www.alacermas.com/img/galeria/files/aluminio/chapa_6061_aluminio(1).pdf)

Acer Inoxidable:

- https://e_archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/13390/Eduardo%20Gil%20Parra.pdf;jsessionid=986CEBFA4530AA8074DFC6940F581216?sequence=1
- https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/128979/133639_TFG-+Estudio+del+funcionamiento,+materiales+y+mantenimiento+de+la+jarcia+firme+en+veleros+actuales.+Andreu+Pujol+Laguna.pdf?sequence=1
- <https://www.alacermas.com/productos.php?categoria=1&subcategoria=152&gama=1&producto=872>

Polièster:

- <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/60083/fichero/Cap%C3%ADtulo+2+BASES+TE%C3%93RICAS%252Fcapitulo+2.pdf>
- <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/22466/PFC%20BERTA%20G%C3%93MEZ%20LLOPART.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- http://www.fondear.org/infonautic/Barco/Velas_Aparejos/Tejidos/Tejidos_Vela.htm
- <https://www.smartsails.es/que-es-el-dacron-y-cuando-debo-elegir-este-tejido/>

[5] Situació d'estudi:

- https://es.wikihow.com/calcular-la-carga-del-viento#Calcular-la-carga-del-viento-por-medio-de-una-f.C3.B3rmula-gen.C3.A9rica_sub
- <http://www.designmethods.eu/en/?portfolio=sail-plan-and-appendages-numerical-optimization-procedure-for-multihulls>

[6] Elements finits:

- https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_de_los_elementos_finitos

[7] ANSYS APDL, gravetat:

- <https://www.prontubeam.com/Aprendiendo-ANSYS/Clases/Aprendiendo-ANSYS-Cargas-Aplicar-peso-propio/>

[8] Impacte Ambiental i econòmic

- https://www.theofficebcn.com/?gclid=CjwKCAjw7e_0BRB7EiwAIH-goHJnzX_NPJRbGicXMF3LRB10U5NFFghHaEruSKfHu1a44L3Yp1T9hoC-sgQAvD_BwE
- <https://tarifaluzhora.es/info/precio-kwh>
- <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20190313STO31218/emisiones-de-co2-de-los-coches-hechos-y-cifras-infografia>
- <https://products.office.com/es-es/compare-all-microsoft-office-products?=&rtc=1&activetab=tab:primaryr2>

